Technische Universität Dresden

Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels Schallemissionsanalyse

Dipl.-Ing.

Ulrich Holder

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Lienig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Henning Heuer

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karlheinz Bock

Gutachter: Prof. Dr. Markus Sause

Tag der Einreichung: 30.08.2018

Tag der Verteidigung: 07.05.2019

Es hört doch jeder nur, was er versteht.

Johann Wolfgang von Goethe, Maximen und Reflexionen

Vorwort

Die vorliegende Arbeit über die zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbunden via Schallemissionsmessung entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG in der Abteilung Entwicklung Werkstofftechnik, EGW, in Weissach. Die Ergebnisse dieser Arbeit resultieren aus den Erkenntnissen die ich während meines Promotionsvorhabens im Zeitraum vom 01.07.2014 bis 31.09.2017 gewinnen konnte.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Heuer, Juniorprofessor für Sensorsysteme für die zerstörungsfreie Prüfung und Strukturüberwachung und Abteilungsleiter am Fraunhofer Instituts für keramische Technologien und Systeme (IKTS), für die wissenschaftliche Betreuung, die vielen Fachdiskussionen, die sein Interesse an der Arbeit ausdrückten, und die wohlwollende und jeder Zeit hilfreiche Unterstützung.

Ich danke Herrn Dr. Robert Volz für die Betreuung meiner Arbeit bei der Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG und Herrn Dipl. Ing. Thomas Hunn für die Erarbeitung und Umsetzung detaillierter Vorentwicklungsumfänge und die damit verbundene Möglichkeit der Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse unter automobilspezifischen Belangen.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fraunhofer Institutes für keramische Technologien und Systeme in Dresden, die einen Beitrag zu dieser Arbeit leisteten. Dieser Dank gilt Herr Dipl.-Geophys. Eberhard Schulze, Herr Msc. Alexander Pietzsch, Frau Dipl.-Ing. Mareike Stephan und Herr Msc. Robert Neubeck. Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Lars Schubert für die konstruktiven Diskussionen und seine umfassende Unterstützung zu jeder Zeit.

Ich danke Frau Dipl.-Ing. Ulrike Hönig für die Beiträge zum Thema im Rahmen ihrer Diplomarbeit und für den fruchtbaren Gedankenaustauch. Des Weiteren möchte ich Herrn Msc. Geophys. Christoph Schreiber für seine Masterarbeit danken, die mit dem Ziel der Korrelation von Ergebnissen der Schallemissionsmessung und dem Fortschritt realer Schädigungsmechanismen in kohlenstofffaserverstärkten Couponproben einen wichtigen Beitrag für mein Verständnis hinsichtlich der Schädigungscharakteristika in FVKs bildete.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH (IMA) in Dresden und der Komponentenentwicklung der VW AG in Wolfsburg und speziell, Dipl.-Ing. Tino Ulbrich und Rainer Schalk danke ich für die Kooperation.

Für die steten Aufmunterungen und die große Geduld bedanke ich mich außerordentlich bei meiner Freundin Fides Geist.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner Mutter für ihren ununterbrochenen Beistand und Ihre uneingeschränkte Förderung und Unterstützung meiner Ausbildung danken, die diese Arbeit erst ermöglicht hat. Leider konnte mein Vater den Fortgang meines Studiums und meiner Promotion nicht mehr erleben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Kurzfassung

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK), im Speziellen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), besitzen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen bei einer verhältnismäßig geringen Dichte hohe Festigkeitswerte. Die Anforderungen hinsichtlich Emissionsreduzierung und der dadurch gestiegene Einsatz von Leichtbauwerkstoffen in der Automobilindustrie macht die Verwendung von FVKs zunehmend interessanter. Ein sicherer Betrieb von FVKs über den gesamten Produktlebenslaufzyklus ist nur durch zerstörungsfreie Prüfungen der Bauteile nach definierten Lastzyklen oder Betriebszeiten möglich. Die Schallemissionsprüfung eignet sich hierzu besonders, da sie als passives Prüfverfahren während Belastungstests eingesetzt werden kann.

Dabei basiert die Schallemissionsprüfung oder Acoustic Emission Testing (AET oder AT) auf der Detektierbarkeit dynamischer Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche von belasteten Prüfobjekten durch hochempfindliche piezoelektrische Sensoren (Messbereich von ca. 50 kHz bis 1 MHz) und deren Umwandlung in weiter verarbeitbare elektrische Signale. Die spezifischen Verschiebungen an der Oberfläche werden durch akustische Wellen (elastische Spannungswellen) erzeugt, die durch temporäre, sehr kleine Materialverschiebungen, bedingt durch beispielsweise das Rückfedern des Materials bei schnell ablaufenden Prozessen wie Rissbildung, Rissausbreitung, Rissuferreibung etc., entstehen können.

Die Schallemissionsprüfung bietet die Möglichkeit, dass aus den unterschiedlichen Laufzeiten der Signale der jeweiligen schallemittierenden Quellen bei einer ausreichenden Anzahl an Sensoren (mindestens drei bei einer ebenen Ortung) der Ursprung der Schallemissionsquelle berechnet werden kann.

Verschiedene Werkstoffkombinationen von FVKs weisen auch eine unterschiedliche Signalcharakteristik bei den emittierten Signalen auf. Die verwendeten Sensoren müssen folglich für den jeweiligen Einsatzzweck ausgewählt werden. Störgeräusche können dabei herausgefiltert werden, wenn sie im für die Schädigung oder dem Schädigungsfortschritt untypischen Frequenzbereich liegen. Hierfür und für das Entfernen von elektromagnetischen Störungen müssen allerdings mehrere Sensoren auf dem Prüfling appliziert sein.

In dieser Arbeit wurde die Schallemissionsprüfung als prüfstandsbegleitendes Bewertungsverfahren qualifiziert und zur Bestimmung des Zustandes von Probekörpern und Bauteilen nach und während unterschiedlicher Belastungstests eingesetzt. Dazu wurden Schallemissionsparameter in repräsentativem Umfang zur Bewertung der Strukturintegrität und zur Zuordnung der verschiedenen Schallemissionsparameter zu verschiedenen Schädigungsarten in FVKs ermittelt. Im Detail wurde der Zusammenhang zwischen verschiedenen Schädigungsmechanismen an Couponproben und CT-Aufnahmen untersucht.

Des Weiteren wurden die identifizierten Schallemissionsparameter jeweils in Abhängigkeit der eingebrachten Belastung (Maximallast, Belastungshistorie, etc.) auf Couponproben und auf unterschiedlich komplex ausgeführten Demonstratorbauteilen ausgewertet. Hierzu wurde die Übertragbarkeit der bei den Grundlagenversuchen gewonnenen Erkenntnisse auf Couponprobenebene auf komplexe Gesamtbauteile in zwei Schritten untersucht und validiert.

Bei Untersuchungen an Demonstratorbauteilen mit komplexeren Geometrien wurden spezielle schallemissionstaugliche Niederlastprüfszenarien entwickelt und untersucht. Hier stand die

Anforderung, das Bauteil bei der notwendigen Belastung für die passiv durchgeführte Schallemissionsanalyse nicht zu schädigen, im Vordergrund.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass mit dem dargelegten Ansatz eine Zuordnung von Schallemissionsparametern zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen möglich ist. Es ist weiterhin möglich, eine Aussage bezüglich der Strukturintegrität des aus FVKs hergestellten Prüflings zu treffen. Dies ist besonders im Hinblick auf Fragestellungen der Betriebsfestigkeit und der Bauteilzustandsbewertung bei der Bauteil- oder Komponentenentwicklung eine wichtige Zusatzinformation.

Abstract

Compared to metallic materials, Fiber Reinforcement Plastics (FRP), in particular Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP), have high strength values at a relatively low density. The requirements with regard to emission reduction and the increased use of lightweight materials in the automotive industry make the use of FRPs more and more interesting. Safe operation of FRPs over the entire product life cycle is only possible by destructive testing of the components after defined load cycles or operating times. The acoustic emission testing (AET or AT) is particularly suitable for this purpose because it can be used as a passive test method during load tests.

AET is based on the detectability of dynamic shifts in the nanometer range on the surface of loaded test objects by highly sensitive piezoelectric sensors (measuring range of approx. 50 kHz to 1 MHz) and their conversion into further processable electrical signals. The specific particle movements on the surface are generated by acoustic waves (elastic stress waves), which can be caused by temporary, very small material shifts, for example due to the rebounding of the material during rapid processes such as cracking or crack surface friction.

With a sufficient number of sensors (at least three in the case of a plane locating), the acoustic emission testing offers the possibility to calculate the origin of the acoustic emission source from the different propagation times of the signals of the respective sound-emitting sources.

Various material combinations of FRPs indicate different signal characteristics for the emitted signals. The sensors used must therefore be selected for the respective application. Disturbing noises can be filtered if they are in the frequency range which is not typical for the damage or damage progress. For this purpose and for the removal of electromagnetic interference however, several sensors must be applied to the test specimen.

In this thesis, the acoustic emission test was qualified as an evaluation method and was used to determine the condition of test specimens and components after and during different load tests. Acoustic emission parameters were determined to a representative extent for the evaluation of the structural integrity and for the assignment of the different acoustic emission parameters to different types of damage in FRPs. In detail, the correlation between different mechanisms of damage to coupon samples and CT images was investigated.

Furthermore, the identified acoustic emission parameters were evaluated in each case on coupon samples and on different complex demonstrator components, depending on the load applied (maximum load, load history, etc.). To do this, the transferability of the findings obtained during the basic tests at the coupon test level to complex components was examined and validated in two steps. In investigations on demonstrator components with more complex geometries, special acoustic emission test scenarios were developed and investigated. Here, the focus was on the need to not damage the component with the necessary load for passively conducted acoustic emission analysis.

The present work shows that, with the approach presented, it is possible to assign acoustic emission parameters to different damage mechanisms. It is furthermore possible to make a statement regarding the structural integrity of the test piece made from FRPs. This is an important supplementary information especially with regard to questions of the operational strength and the component state evaluation during component or component development.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis

ADC	analog-to-digital-converter
AE	Acoustic Emission
AIC	Akaike Information Criterion
AT	Acoustic Emission Testing
BUP	Biegeumlaufprüfung
CAN	Controller Area Network
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CT	Computertomographie
dB	Dezibel
dB_{AE}	Schallemissionspegel in dB
DGZfP	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung
E_{abs}	absolute Energie
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
FB	Faserbruch
FFT	Fast Fourier Transformation
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HM	High-Modulus (hochmoduliger Fasertyp)
HT	High-Tenacity (hochfester Fasertyp)
Hz	Hertz
IMA	Institut für Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH
i.O.	in Ordnung
kHz	Kilohertz
MAR	Measured Amplitude Ratio
MAS	Multi-Channel Acoustic Measurement System
n.i.O.	nicht in Ordnung
4PB	4-Punkt-Biegung
PAG	Porsche AG
QI	quasiisotrop

RMS	Root Mean Square
ST	Super-Tenacity (höchstfester Fasertyp)
UD	unidirektional
USB	Universal Serial Bus
WPF	Weighted Peak Frequency
WT	Wavelet-Transformation
Zfb	Zwischenfaserbruch
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
ZWARP	zweiachsialer Räderprüfstand

Symbolverzeichnis

C	Elastizitätsmodul
D	dielektrische Verschiebungsflussdichte
E	elektrisches Feld, Energie
F	Kraft
F_R	Felicity Ratio
G	Verstärkung
I	Intensität der Strahlung
J	Matrix der partiellen Ableitung
τ_{int}	Scherspannung Faser / Matrix
I	Intensität der Strahlung
N	Signallänge in Samples
R_i	zugehöriger Samplewert i zu R
$R(T)$	beliebige Funktion im Zeitbereich
$\bar{R}(t)$	Hilberttransformierte einer Funktion R(t), (H{R(t)})
R_w	Funktion R in einem definierten Fensterbereich w
$\tilde{R}$	gemittelter Wert der Funktion R
S	Fläche
T_B	Bindungsenergie
T_G	Glasübergangstemperatur
$T_{kin,e}$	kinetische Energie
T_{max}	Schmelztemperatur
T_w	letzter Samplewert in einem definierten Fensterbereich w
U	Spannung, Amplitude
U_A	Ausgangsspannung
U_E	Eingangsspannung
$\tilde{U}(f)$	Spannung im Frequenzbereich
Z	Ordnungszahl
c	Wellengeschwindigkeit
d	Durchmesser
d_f	Faserdurchmesser

e	piezoelektrische Kraftkonstante
$f_{centroid}$	Schwerpunktsfrequenz
f_{Ny}	Nyquistfrequenz
f_s	Samplingfrequenz
k	Wellenzahl
l	Länge
l_{krit}	kritische Länge
m	materialabhängiger Exponent
pJ	Picojoule
r	Residuum
t	Laufzeit eines Signals
t_0	Ankunftszeit eines Signals
t_A	Anstiegszeit eines Signals
var	Standardabweichung
w	definierter Fensterbereich in dem der Startwert erwartet wird
α	Dämpfungskoeffizient
ε_0	Permittivität des Vakuums
γ	Röntgenquant
ς	Scherwinkel
κ	Wärmeleitfähigkeit
ν	Poissonzahl (Querdehnungsverhältnis)
ω	Kreisfrequenz
ρ	Massendichte
σ	elastische Spannung
σ_F	Faserfestigkeit
τ_{int}	Scherspannung Faser zu Matrix

1 Einleitung

Faserverstärke Kunststoffe (FVK), die in der Vergangenheit im Automobilbau hauptsächlich im Motorsport ihren Einsatz fanden, sind heute im modernen Automobilbau kaum noch wegzudenken. Dies hat seinen Ursprung in einer weltweiten Rohstoffverknappung und auch in gesetzlichen Regelungen hinsichtlich der Emissionsminimierung für PKWs. Um die dadurch entstandenen Emissionsziele im Flottenverbrauch erreichen zu können, gewinnt der Leichtbau weiterhin an Bedeutung. So werden bei gewissen Fahrzeugen sicherheitsrelevante Bauteile, wie beispielsweise ein Monocoque oder auch sicherheitsrelevante Fahrwerkskomponenten, aus FVKs hergestellt. Bei eben solchen FVK-Bauteilen steht die Zuverlässigkeit und damit die Absicherung der Betriebsfestigkeit über den gesamten Produktlebenslaufzyklus im Fokus. Diese strukturrelevanten Bauteile werden anhand der aus der Kontinuumsmechanik bekannten Materialkennwerte ausgelegt. Allerdings wird die Lebensdauer von FVK-Bauteilen sehr stark durch die Materialermüdung beeinflusst. So können beispielsweise Temperaturschwankungen, UV-Strahlung, wechselnde mechanische Belastungen aber auch Missuse große Auswirkungen auf die Werkstoffeigenschaften und somit auf die Betriebsfestigkeit haben. Nicht detektierte Vorschädigungen oder Schäden im Werkstoff, wie Rissbildung in der Matrix, Delaminationen, Faser Pull-Out oder gar Faserbündelbrüche, können zu frühzeitigem Versagen des Bauteils führen. Eine Überwachung hinsichtlich dieser Vorschädigungen und Schädigungen im Werkstoff sind vor allem bei der Auslegung unter Leichtbaukriterien unerlässlich. Zerstörungsfreie Prüfmethoden für FVK-Bauteile rücken somit weiter in den Mittelpunkt.

Hierbei gewinnt die Schallemissionsanalyse als Messverfahren immer mehr an Bedeutung, welches nicht nur zur Bauteilprüfung (z.B. End-Off-Line-Prüfungen oder Bauteilprüfung nach unterschiedlichen Belastungsregimen), sondern auch während des Belastungszyklus bei der Bauteilerprobung eingesetzt werden kann. Die mit seismologischen Messungen vergleichbare Schallemissionsanalyse stellt zurzeit folglich eines der wenigen Verfahren dar, welches Defektfortschritte im Werkstoff während Materialermüdungstests quantifizieren kann. Erfolgreich eingesetzt wird die Schallemissionsanalyse beispielsweise bisher bei der zerstörungsfreien Prüfung von Druckbehältern, Überwachung von Brücken und bei der Zustandsüberwachung von Rotorblättern von Windkraftanlagen [1]. Dabei basiert dieses Messverfahren auf der Detektion von akustischen Emissionen bei Vorschädigungen oder Schädigungen im Werkstoff. Es werden Oberflächenwellen erfasst und analysiert, die bei infinitesimalen Materialverschiebungen (z.B. Rissbildung, Reiben von Fasern an Matrixwerkstoff, etc.) als Raumwelle ausgelöst werden.

Die Kenntnis des akustischen Verhaltens von FVK-Bauteilen von Neuzustand bis zum Versagen des Bauteils unter jeweiliger Betriebslast kann Aufschlüsse über das Vorschädigungs- und Schädigungsverhalten geben. Des Weiteren können Aussagen hinsichtlich des Schädigungsfortschrittes gewonnen werden. Somit kann die Schallemissionsanalyse zu einer effizienteren und genaueren Bauteilauslegung beitragen.

Um die Möglichkeiten der Schallemissionsanalyse hinsichtlich der Bewertung des Schädigungsgrades von struktur- und sicherheitsrelevanten Bauteilen aus FVKs voll ausschöpfen zu können, müssen akustische Parameter untersucht und analysiert werden. So können qualifizierte und verifizierte Aussagen zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen abgeleitet werden, die eine bewertende Aussage über den Bauteilzustand zulassen.

Diese Arbeit verfolgt dabei folgenden Ansatz:

- Identifikation und Gruppierung von Schallemissionsparametern hinsichtlich faserverbundwerkstofftypischen Schädigungsmechanismen auf Couponebene in automobilindustrierelevanten Dimensionen
- Zuordnung und Nachweis unterschiedlicher Schädigungsmechanismen zu verschiedenen Schallemissionsparametern auf Couponebene
- Übertrag der Erkenntnisse auf komplexere Geometrien und Bauteile
- Ermittlung von Bewertungskriterien auf Basis der Schallemissionsanalyse zur Zustandsbewertung eines FVK-Bauteiles

2 Grundlagen

2.1 Faserverbundwerkstoffe (FVK)

Verbundwerkstoffe gehören zu einer verhältnismäßig jungen und modernen Werkstoffklasse, die sich durch die jeweilige Verarbeitung der Werkstoffkombinationen und die damit verbundene potentielle Verbesserung der Werkstoffeigenschaften im Vergleich zu z.B. metallischen Werkstoffen in diversen Anwendungsbereichen etabliert haben [2]. So kann man diese Werkstoffe beispielsweise in der Sportgeräteindustrie, der Luftfahrtindustrie, der Elektroindustrie und natürlich auch in der Automobilindustrie wiederfinden. Begründet ist dies mit der Erzeugung von Werkstoffeigenschaften des Werkstoffverbundes, der denen der Einzelwerkstoffe überlegen sind. Dabei besitzen sie meist eine hohe Festigkeit und Steifigkeit gepaart mit einer geringen Dichte und einer geringen Wärmedehnung. Jedoch ist aufgrund der Anisotropie dieser Werkstoffe das Dimensionierungsverfahren und die Simulation des Werkstoffverhaltens bei den komplexen Schädigungsmechanismen sehr aufwändig [3]. Zusätzlich besitzen diese Werkstoffe eine geringe Wärmeformbeständigkeit, was hauptsächlich an den verwendeten Matrixwerkstoffen liegt. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung der Schallemissionsmethode zur Schadensdetektion in Faserverbundwerkstoffen. Deshalb stehen FVKs im Fokus der Arbeit.

2.1.1 Aufbau und Wirkungsweise von faserverstärkten Kunststoffen

Im Wesentlichen sind faserverstärkte Verbundwerkstoffe gezielte Kombinationen von mindestens zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen Fähigkeiten, Eigenschaften und Aufgaben. Dabei setzen sie sich aus mindestens einer Verstärkungskomponente, meist den Fasern, und aus einem Trägermaterial, der Matrix, zusammen. Die Kombination von Faser und Matrix erzeugt einen Werkstoffverbund, dessen Materialeigenschaften deutlich besser sind als die der Einzelwerkstoffe. Es ist beispielsweise möglich, die mechanischen Eigenschaften solcher Werkstoffverbunde durch eine Variation oder Modifikation von Größe, Form und räumlicher Verteilung einzustellen. Die folgende Tabelle 2.1-1 soll eine Übersicht der gängigen Faser- und Kunststoffmaterialien für FVKs geben.

Polymerkomponente		Faserkomponente
Duroplastische Matrix	Thermoplastische Matrix	Anorganische Fasern (Glas, Kohlenstoff)
		Synthetische Faser (Aramid, Polyethylen)
Ungesättigte Polyesterharze **Vinylesterharze** **Epoxidharze**	Polyetheretherketon Polyetherimide Polysulfon	Hybridwerkstoffe (z. B. Glas und Kohlenstoff)
		Naturfaser (Hanf, Flachs)

Tabelle 2.1-1 Übersicht Faser- und Kunststoffmaterialien nach [4]

Des Weiteren werden die bearbeiteten FVKs in dieser Arbeit auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) eingeschränkt, da diese aktuell bei der PAG für sicherheitsrelevante und

Strukturbauteile vorrangig eingesetzt werden. Die Kombination aus einem hohen E-Modul und geringer Dichte sind ausschlaggebend für den Einsatz als Leichtbauwerkstoff. Dabei weisen die Kohlenstofffasern bei ihren mechanischen Eigenschaften ein großes Spektrum an einstellbaren Festigkeitswerten aus, aus der je nach Anwendungszweck und Bauteilanforderung gewählt werden kann. Die Kohlenstofffasern lassen sich u.a. in die HT-Fasern (High-Tenacity), ST-Fasern (Super-Tenacity) und HM-Fasern (High-Modulus) unterteilen, wobei die faserparallele Druckfestigkeit deutlich hinter ihrer Zugfestigkeit zurückbleibt. Auch bei der Temperaturbeständigkeit weißt die Kohlenstofffaser im Vergleich zu Aramid- und Glasfasern erkennbar höhere Werte auf [5]. Bei einem faserverstärkten Kunststoff muss allerdings bei der Temperaturbeständigkeit immer das Matrixmaterial mitbetrachtet werden. Die unterschiedlichen Kunststoffe, welche als Matrixmaterial in Frage kommen, weisen eine deutlich niedrigere Temperaturbeständigkeit auf und hier muss die Glasübergangstemperatur TG (Temperatur bei der ein Polymer erweicht) je nach Einsatzzweck berücksichtigt werden. Eine weitere spezifische Eigenschaft von CFK-Werkstoffen ist deren Anisotropie (richtungsabhängige Eigenschaften des Werkstoffes). In der folgenden Abbildung 2.1-1 ist zum besseren Verständnis die schematische Abhängigkeit der Faserorientierung von der Zugfestigkeit dargestellt.

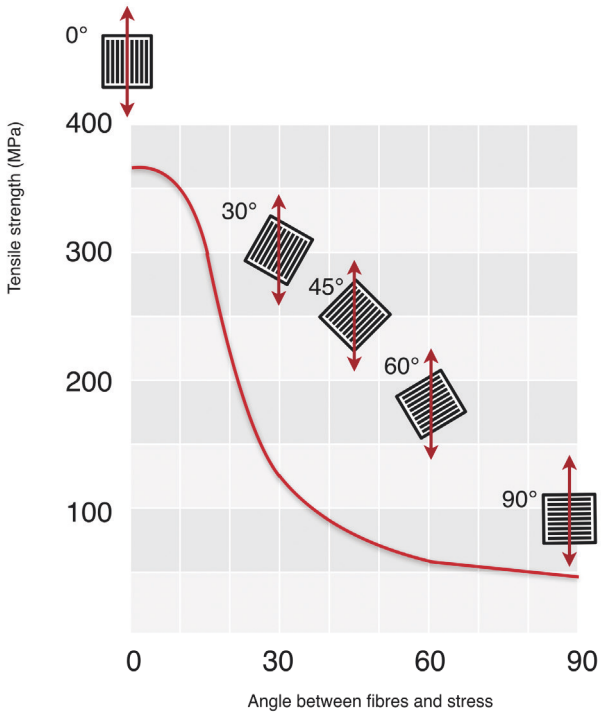


Abbildung 2.1-1 Mechanische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Faserorientierung nach [4]

Es hängen aber nicht nur die mechanischen Eigenschaften der Faserverbunde von der Faserorientierung, der Belastungsrichtung bzw. der Last- oder Momenteneinleitung ab, sondern auch die thermischen Eigenschaften. So weist der gemäß [6] quasiisotrope Lagenaufbau in der Faserebene einen beinahe isotropes Werkstoffverhalten auf. Darüber hinaus werden in dieser Arbeit unidirektionale (UD), [±45°] und [0°/90°] Lagenaufbauten zur Schallemissionscharakterisierung auf Couponebene bearbeitet.

Es ist darauf zu achten, dass herstellungsbedingt bei CFK-Werkstoffen keine Kratzer oder andere Oberflächenbeschädigungen entstehen, da durch solche lokalen Fehlstellen aufgrund einer erhöhten Kerbwirkung Risse entstehen können. Insbesondere scharfe Kerben, die zu Spannungsspitzen bei der Belastung des Werkstoffverbundes führen können, senken durch ihren hohen Formfaktor die Festigkeit des Materials. Die örtlich begrenzten Spannungsspitzen können durch die eher spröden Fasern nicht aufgenommen und abgebaut werden. Ein einzelner Faserbruch oder Faserbündelbruch führt nicht zwangsweise zu einem Bauteilversagen [3]. Der Grund hierfür sind Rissstoppeffekte, die in Faserverbundwerkstoffen z.B. zwischen den unterschiedlichen Schichten (auch gefördert durch die unterschiedliche Orientierung der unterschiedlichen Schichten) oder auch an den Fasern auftreten können. Somit können Faserverbundwerkstoffe je nach Faser-Matrix-Kombination auch eine hohe Bruchzähigkeit aufweisen. Trotz einer gewissen Schädigungstoleranz bei Faser- und Faserbündelbrüchen in einem Faserverbund, kann der Faser- oder Faserbündelbruch als größter Schädigungsgrad in einem Faserverbund angesehen werden. Dabei ist der Schädigungsmechanismus in einem CFK-Bauteil grundlegend von der Art der Belastung, dem Aufbau der CFK-Komponente und den Umgebungsbedingungen (quasistatisch, wechselnd, temperiert, etc.) abhängig. Darüber hinaus beeinflussen werkstoffspezifische Größen wie Faser-Matrix-Haftung, Grenzflächeneigenschaften der unterschiedlichen Einzelwerkstoffe und zuletzt auch die geometrischen Gegebenheiten des Bauteils in Kombination mit der Lasteinleitung das Versagensverhalten der Probe oder des Bauteils. In Abbildung 2.1-2 sind die bekanntesten und gängigsten Versagensarten bei Faserverbundwerkstoffen dargestellt. Unter anderem zählen zu den Schädigungsmechanismen von Faserverbunden mit Lang- oder Endlosfasern Deformation bzw. Bruch der Matrix, Faser-Matrix-Ablösung (Debonding), Freilegen der Faser durch Reißen der Matrix (Bridging), Ablösen einzelner Schichten (Delamination), Herausziehen der Faser aus der Matrix (Pull-Out) und der Faserbruch.

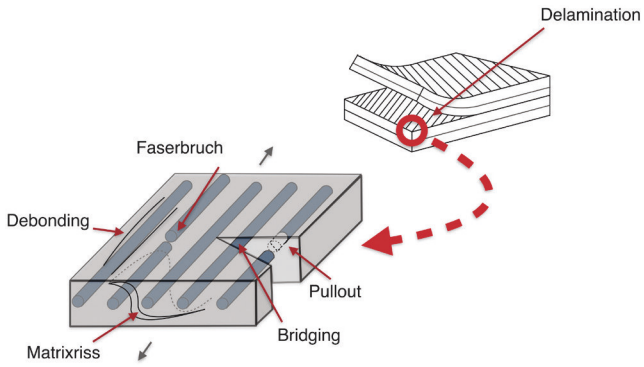


Abbildung 2.1-2 Ausgewählte Schädigungsmechanismen in FVK-Werkstoffen nach (University of Liège, Computational & Multiscale Mechanics of Materials)

2.2 Schädigungsmechanismen und Versagensarten

Die Bruchneigung in Laminaten ist abhängig von der Krafteinleitung und der Faserorientierung. Deshalb wird bei der Fertigung der Laminate und Bauteile meist die Faserrichtung variiert. Generell sollte auf eine symmetrische Verteilung der Einzelfaserlagen und deren Orientierung in Bezug auf die Mittelebene geachtet werden. So kann die ungewollte Verwindung oder Krümmung des Werkstoffes nach den temperaturgeführten Herstellungsprozessen und die damit verbundene Abkühlung und Schwindung vermieden werden. Idealerweise wird davon ausgegangen, dass die Fadenwelligkeit in den einzelnen Schichten nicht existiert und sich der Werkstoffverbund (Schichtverbund) aus mehreren

unidirektionalen Schichten aufbaut [7]. Nachfolgend werden die relevanten Schädigungsmechanismen und Versagensarten von FVKs erläutert.

2.2.1 Zwischenfaserbruch

Von einem Zwischenfaserbruch (Zfb) spricht man, wenn sich die verwendeten Werkstoffe innerhalb des Werkstoffverbundes trennen. Dies ist ein matrixdominierter Schädigungsmechanismus, der hauptsächlich innerhalb des Matrixmaterials, aber auch an der Faser-Matrix-Grenzfläche auftritt Abbildung 2.2-1. In ungünstigen Fällen kann ein solcher Riss eine komplette Schicht in einem FVK durchziehen. Dieser Schädigungsmechanismus hat eine sehr geringe Auswirkung auf die Festigkeit und Steifigkeit des FVKs, da die Fasern kaum beschädigt werden und weiterhin die Kräfte und Momente im Verbund aufnehmen können. Zwischenfaserbrüche entstehen meist durch eine punktuelle Dehnungsüberhöhung die entsteht, wenn eine orthogonal zur Faserorientierung angreifende Kraft den Verbund schwächt, da die Fasern aufgrund ihres meist deutlich höheren E-Moduls im Vergleich zur Matrix kleinere Querdehnungen aufnehmen können. Folglich muss die Matrix die entstehende größere Dehnung ausgleichen und kann dabei geschädigt werden. Die Dehnungsüberhöhung in der Matrix hängt vom Faservolumengehalt und vom Unterschied des E-Moduls der Fasern und der Matrix ab. So ist die Querbruchdehnung des FVKs geringer als die Bruchdehnung der jeweils verwendeten Fasern [8].

2.2.2 Delamination

Eine Delamination ist ein Riss, der zwischen zwei oder mehreren aneinander liegenden Grenzflächen verläuft. Der Riss entsteht somit zwischen den unterschiedlichen Schichten eines FVKs und kann zum kompletten Abheben einzelner Schichten führen. Sehr oft sind Fehlstellen und Defekte in FVKs an Kanten, Rändern und auch an Bearbeitungsstellen der Ursprung für die Bildung von Delaminationen. An diesen Stellen kommt es durch die sogenannte Missanpassung zwischen den unterschiedlichen Lagen zu hohen interlaminaren Spannungen, die schädigend wirken. Wenn eine Laminatschicht durch einen Riss komplett von einer anderen getrennt wird, entstehen aufgrund von hohen Spannungen an der Rissspitze im Laminat punktuelle Delaminationen. Diese Art der Risse werden als intralaminare Risse bezeichnet [9].

2.2.3 Faser Pull-Out

Der Pull-Out steht für das Ausziehen der Faser oder Faserbündel aus der Matrix. Gewöhnlich kommt es zum Faser Pull-Out nur, wenn zuvor ein Faserbruch erfolgte und den Verbund dadurch bereits geschädigt hat Abbildung 2.2-1. Die Faser oder das Faserbündel muss dabei nicht zwingend an der Rissflanke versagen, sondern kann in einem beliebigen Bereich zwischen dem Spannungsmaximum der Rissflanke und dem Minimum innerhalb der Faser oder Faserbündel versagen [5]. Sofern das Teilbruchstück der Faser, welches in der Matrix verbleibt und das Risswachstum hemmen soll, kleiner ist als die kritische Faserlänge, so wird das Teilstück aus der Matrix herausgezogen. Bei diesem Vorgang muss die rückhaltende Scherspannung τ_{int} überschritten werden. Ausnahmen bilden FVKs, die ausschließlich mit Kurzfasern verstärkt sind, bei denen die Fasern immer kleiner als die kritische Faserlänge sind. Hier kommt es direkt zum Pull-Out und nicht zum Faserbruch. Die Faserlänge hat keinen Einfluss auf das Entstehen eines Pull-Outs. Die Länge des in der Matrix verbleibenden Faserteilstückes ist ausschlaggebend für die Entstehung eines Pull-Outs.

2.2.4 Debonding

Beim Lösen der Matrix von den Fasern spricht man von Debonding. Dieser Schädigungsmechanismus entsteht, wenn eine Rissausbreitung innerhalb der Matrix stattfindet und diese Risse auf Fasern treffen. Aufgrund der höheren Bruchzähigkeit des FVKs im Vergleich zur Matrix, sollte die Faser, wenn der Matrixriss sie erreicht, nicht versagen. Gemäß den Untersuchungen von Rösler, Harders und Bäker [5] erfolgt dies durch das Nachgeben der Faser-Matrixgrenzflächen. Der Rissfortschritt ist orthogonal zu den Grenzflächen und somit parallel zu den angreifenden Zugspannungen. An der Rissspitze kann es aufgrund des überwiegend vorherrschenden Zugspannungsanteils zu einer Öffnung der Grenzflächen kommen. Durch die schwache Bruchzähigkeit der Grenzfläche zwischen Matrix und Faser entstehen die Ablösungen der zwei Komponenten des Werkstoffverbundes. Nachdem sich die Matrix an diesen Stellen von den Fasern abgelöst hat, kann der Riss sich an der rissabgewandten Seite in der Matrix weiter ausbreiten und den Verbund weiter schädigen Abbildung 2.2-1.

2.2.5 Faserbruch

Wenn die Zugbelastung an einer oder mehreren Einzelfasern oder ganzen Faserbündeln die Zugfestigkeit der belasteten Fasern übersteigt, kommt es zu einem Faserbruch Abbildung 2.2-1. Dabei versagen meist mehrere Einzelfasern. Beispielsweise wird bei einer Längsdruckbeanspruchung die Tragfähigkeit eines FVKs so geschwächt, dass die Matrix ihrer Stützfunktion nicht mehr nachkommen kann um ein Knicken der Fasern zu unterbinden. Puck stellte anhand seiner Untersuchungen an Probekörpern fest, dass nicht alle Fasern auf einmal versagen [7]. So versagen die ersten Einzelfasern bei ca. 70% bis 80% der maximalen Belastung und erst danach bei kontinuierlicher Laststeigerung versagen bei einem höheren Belastungsniveau Faserbündel. Immer wenn Fasern in Belastungsrichtung versagen, werden an die verbleibenden Faserbündel die dadurch wachsende Belastung weitergegeben und es kommt final zu einer so großen Belastung (Spannungsüberhöhung), dass der Werkstoffverbund versagt. Zusätzlich werden beim Faserversagen hohe Energien frei, was den gesamten Verbund im Bereich der Faserbrüche schädigen kann [8]. Nachfolgend sind die beschriebenen Versagensmechanismen grafisch erläutert.

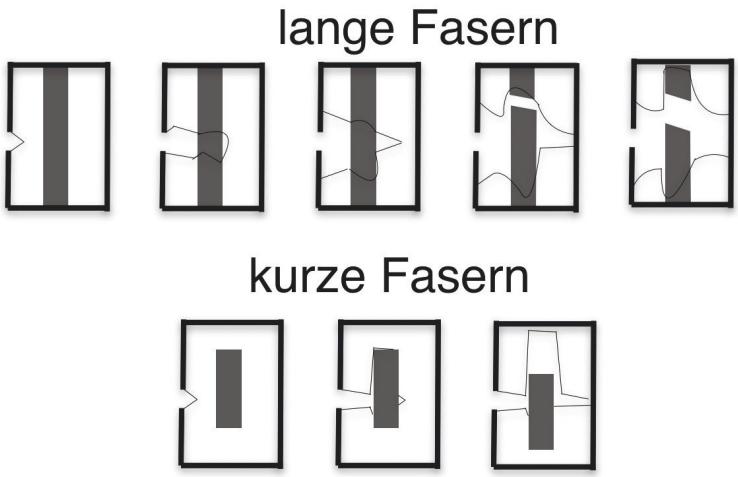


Abbildung 2.2-1 Schematische Darstellung der Versagensmechanismen nach [10]

In der Literatur wird von drei essentiell relevanten Bruchtypen gesprochen. Der interlaminare, intralaminare und translaminare Bruchtyp. In

Abbildung 2.2-2 sind die drei Bruchtypen schematisch dargestellt. Dabei gibt es vier verschiedene Versagensarten, die grundlegend differenziert werden: Zug, Druck, Biegung und Torsion, die auch in Kombination auftreten können.

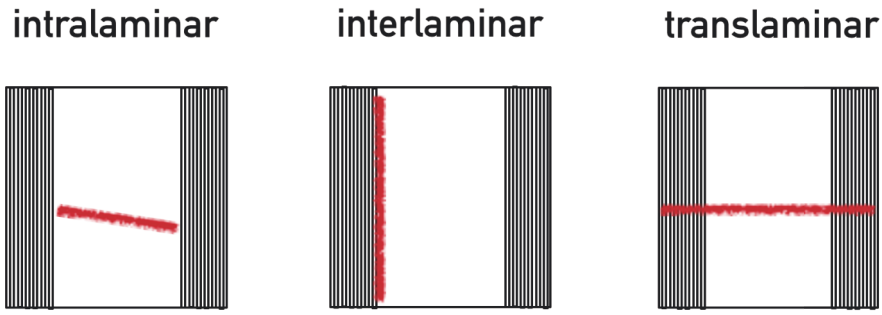


Abbildung 2.2-2 Bruchtypen in Schichtverbunden nach [10]

Wie in. zu erkennen ist, sind intralaminare Brüche ausschließlich in einer Laminatschicht zu finden. Der interlaminare Bruch entsteht bei Matrixbrüchen zwischen zwei oder mehreren Grenzflächen und der translaminare Bruch ist in Laminatschichten mit unterschiedlichen Orientierungen zu finden. Wenn der Riss quer zur Faserrichtung verläuft ist dies ursächlich für Faserbrüche. Unterschieden werden die unterschiedlichen Brucharten in Faserbruch (FB) und Zwischenfaserbruch (Zfb). Nachfolgend werden die vier Versagensarten nach Schmitt detaillierter beschrieben [10].

2.2.6 Zugversagen

Hier muss zwischen einer Zugbelastung in Richtung der Faserorientierung und gegen die Faserorientierung unterschieden werden. In Richtung der Faserorientierung sind überwiegend translaminare Brüche quer zur Faserlängsrichtung zu erwarten. Die Faserbrüche treten meist mit eindeutigen Pull-Outs an den Bruchflächen auf. Bei Zugbelastung orthogonal zur Faserorientierung bilden sich Matrixrisse, die sich interlaminar und parallel zur Faserorientierung ausbreiten und verlaufen.

2.2.7 Druckversagen

Charakteristisch für das Versagen eines FVKs aufgrund einer Druckbelastung ist die Bildung von Druckstufen in der Bruchfläche, die durch das Ausknicken der Fasern erzeugt werden. Diese entstehen, wenn Fasern mit einer guten Haftung an der Matrix zeitgleich ausknicken. Das Phänomen ist umso stärker ausgeprägt, je höher der Faseranteil in der Druckbelastungsrichtung ist. Diesem Versagensbild liegt ein translaminares Bruchverhalten zugrunde [10].

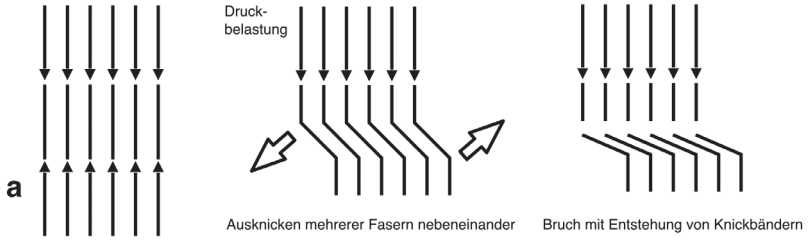


Abbildung 2.2-3 Vereinfachte Darstellung der Bildung von Knickbändern durch Druckbelastung nach [10]

2.2.8 Biegeversagen

Bei der Biegebeanspruchung entstehen Zug- und Druckspannungen im Laminat und der FVK versagt im Allgemeinen wegen den eingebrachten Schubspannungen zwischen den Einzelschichten. Die Bruchentwicklung geht hierbei anfangs von einem interlaminaren Bruch bis hin zu einem translaminaren Bruch bei steigender Biegebelastung. Die durch die Biegebelastung erzeugte Schubspannung, verursacht die Bildung von „Scallop“ – und „Hackle“ – Strukturen [10]. „Scallops“ werden Ausbrüche der Matrix genannt, die ihre Gegenstücke als „Hackles“ an der Matrix haftend finden. Ein Hackle ist folglich ein kleines an der Faser haftendes Bruchstück aus Matrixmaterial. Dabei entstehen unterschiedlich raue Oberflächenstrukturen, die wiederum selbst untersucht und eingeteilt werden können. Eine einfache Einteilung der beiden Bruchflächen kann der jeweiligen Belastungsart zugeordnet werden. Die rauere Oberfläche ist die mit der „Hackle“ – Struktur, welche auf Zug beansprucht wurde. Die weniger raue Oberfläche ist die „Scallop“ – Strukturseite, die auf Druck beansprucht wurde.

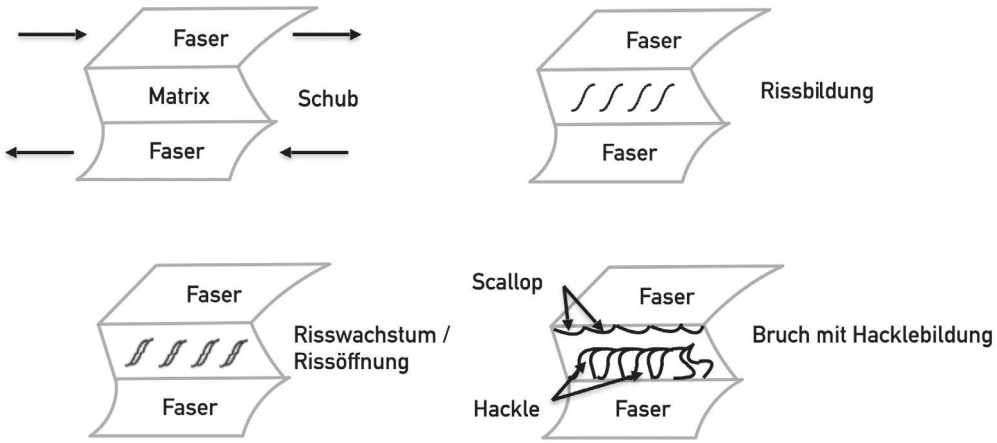


Abbildung 2.2-4 Schematische Darstellung der Entstehung von Scallops und Hackles durch Biegebelastung nach [10]

2.2.9 Torsionsversagen

Das Torsionsversagen ist eine Mischung aus Druckversagen und Zugversagen. Daraus resultiert die Unterteilung der Bruchfläche in zwei Bereiche. Einen Bereich, der der Torsionsachse naheliegt, und den Randbereich. Im Bereich nahe der Torsionsachse kommt es analog zum Druckversagen zur Stufenbildung im Versagensbereich und im Randbereich ist das Versagen eher Richtung Zugversagen einzustufen. Somit gibt es beim Torsionsversagen Bereiche mit interlaminaren und intralaminaren Bruchtypen [10]. Für Anwendungen von FVKs bei sicherheitsrelevanten Bauteilen und Strukturbauteilen dienen die Fasern rein als

Verstärkungsmaterial. Die viel höhere Zugfestigkeit und die deutlich kleinere Bruchdehnung der Fasern im Vergleich zum Matrixmaterial führen dazu, dass in den meisten Belastungsfällen im ersten Schritt des Versagensmechanismus eine Rissbildung in der Matrix zu erkennen ist. Dies ist jedoch abhängig vom Lagenaufbau des FVKs. Bei schlechter Faser-Matrix-Anhaftung wird die Kraftübertragung an den Grenzflächen (Interfacebereich) im Belastungsfall stark eingeschränkt und es kommt in eben diesen Bereichen zu Schäden, z.B. als Pull-Out oder als Debonding. Je nach Krafteinleitung in den Werkstoffverbund ist der Pull-Out der Fasern bei parallel zur Belastungsrichtung liegenden Fasern zu erwarten, wohingegen das Debonding eher bei schrägliegenden Fasern auftritt [11].

Faserbrüche sind vor allem bei der Untersuchung von UD-Materialien bei reiner Zugbelastung parallel zur Faserorientierung detektierbar. Bei einer Zugbelastung orthogonal zur Faserorientierung sind hingegen maßgeblich Zwischenfaserbrüche (reines Matrixversagen) zu erwarten. Im Allgemeinen kommen Faserbrüche in Kombination mit anderen Versagensmechanismen (z.B. Matrixversagen) vor. Im Vergleich zur Zugbelastung verhalten sich Biegeproben hauptsächlich in gegengesetzter Weise. Je nach Laminataufbau ist auch ein Versagen durch Delamination möglich. Dabei lösen sich einzelne bis mehrere Schichten im Verbund ab, was auf Zwischenfaserbrüche in benachbarten Schichten zurück zu führen ist [12].

Bei Faserverbundwerkstoffmaterialien ist es schwer, eine Aussage über Vorschäden oder Schäden im Werkstoff selbst zu treffen. Bauteile aus diesen Werkstoffen bieten im Vergleich zu metallischen Bauteilen kaum die Möglichkeit, durch eine visuelle Kontrolle gravierende Schäden festzustellen, die z.B. durch eine Schlageinwirkung oder durch Herstellungsfehler (Faserondulation, Matrixarmut oder Matrixnester in bestimmten Bereichen des Bauteils, mangelnde Faser-Matrix Haftung) entstanden sind. Genauso verhält es sich mit Alterungseffekten oder Dauerbelastung während des normalen Betriebes. Der Schädigungsgrad in Faserverbunden hat jedoch einen maßgeblichen Einfluss auf die Materialeigenschaften und somit auf die Betriebsfestigkeit der Bauteile. Deshalb benötigt man zerstörungsfreie Prüfverfahren (z.B. CT, Ultraschall, Thermographie), um eine Aussage über den Schädigungsgrad des Werkstoffes und des Bauteils treffen zu können. Die gängigen und eben erwähnten zerstörungsfreien Prüfverfahren bieten allerdings nicht die Möglichkeit, eine Aussage über das Schädigungsverhalten und den Schädigungsgrad während des Belastungszustandes bei Faserverbundwerkstoffbauteilen zu tätigen. Deshalb wird in dieser Arbeit die Schallemissionsanalyse als ZfP-Verfahren speziell zum Monitoring während Belastungstests eingesetzt und qualifiziert.

3 ZfP für FVK

3.1 Allgemein

Zerstörungsfreie Prüfverfahren finden für Bauteile aus den unterschiedlichsten Werkstoffen und Industriezweigen ihre Anwendung. Insbesondere steigende Anforderungen hinsichtlich Anlagen- und Bauteilsicherheit führen zu einer permanenten Weiterentwicklung von ZfP-Verfahren. Das oberste Ziel von zerstörungsfreien Prüfverfahren ist die Sichtbarmachung von Fehlstellen, um potentiellen Schaden zu verhindern. Deshalb können ZfP-Verfahren sowohl entwicklungs- und erprobungsbegleitend eingesetzt werden, um neue Erkenntnisse für die Forschung oder Bauteilentwicklung in unterschiedlichen Industriezweigen zu generieren, als auch als qualitätssichernde Maßnahmen verwendet werden. Letzteres wird häufig bei der Absicherung von Fertigungs- und Herstellungsqualitätsstandards angewandt. Da im Zuge dieser Arbeit die Schallemissionsanalyse als ZfP-Verfahren erforscht wurde und hierfür als Validierung und Verifizierung die Computertomographie als ZfP-Verfahren eingesetzt wurde, soll eine kurze Exkursion in die Grundlagen der Computertomographie für ein besseres Verständnis sorgen.

3.2 Grundlagen der Computertomographie

3.2.1 Die Röntgenstrahlung

Die Röntgenstrahlung zählt zu den elektromagnetischen Wellen. Sie können mit einem Gleichspannungsbeschleuniger (Röntgenröhre) künstlich erzeugt werden. Bestandteile der Röntgenröhre sind eine beheizbare Kathode und eine Anode im evakuierten Raum. Dieser, als einfachster Aufbau einer Röntgenröhre geltend, ist schematisch in Abbildung 3.2-1 dargestellt.

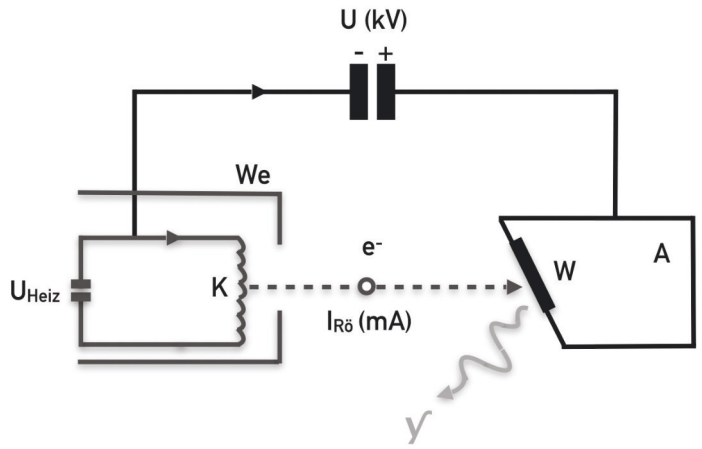


Abbildung 3.2-1 Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre, U_{Heiz} Heizspannung für Katode, We Wehneltzylinder, $I_{Rö}$ Röhrenstrom, A Anode mit Wolframeinsatz W, U externe Spannung zur Elektronenbeschleunigung, γ emittierte Röntgenstrahlung nach [13]

Das Erhitzen der Kathode sorgt für ein permanentes Freisetzen von Elektronen und die angelegte Spannung beschleunigt die freien Elektronen zur Anode. Die Aufprallenergie der Elektronen in Kombination mit einsetzenden Wechselwirkungen auf dem Schwermetalleinsatz sorgt für das Emittieren der Röntgenstrahlung. Nach Krieger [13] erzeugt die Wechselwirkung zwischen Atom und Elektron dabei zwei verschiedene Arten von Röntgenstrahlung, die im Nachgang kurz erläutert werden:

- die kontinuierliche Röntgenbremsstrahlung
- die charakteristische Röntgenbremsstrahlung

3.2.2 Die kontinuierliche Röntgenbremsstrahlung

Wie bereits erläutert werden die freien Elektronen durch die Spannung der Kathode in Richtung Anode beschleunigt. Sie treffen danach auf den Schwermetalleinleger (Anodenoberfläche) und einige Elektronen werden vom elektrischen Feld der Atomkerne (Coulombfeld) angezogen und durch die Coulombkräfte auf eine Art Hyperbelbahn um den Kern gezwungen.

Durch das Abbremsen und den damit verbundenen Energieverlust wird elektromagnetische Strahlung (Röntgenbremsstrahlung) frei. Die Energiebilanz dieser Strahlungsemission lautet:

$$T_{vor}=T_{nach}+T_{\gamma}$$

Formel 3.2-1 Energiebilanz Strahlungsemission

Dabei ist T_{vor} die Energie vor dem Eintreten in das Coulombfeld und berechnet sich aus der Summe der Energie nach der Ablenkung und Abbremsung T_{nach} und der Energie der Röntgenquants T_{γ}. Die Energiemenge der kontinuierlichen Röntgenbremsstrahlung ist dabei abhängig von der Entfernung zwischen Atomkern und Elektron. Je größer deren Abstand ist, desto kleiner ist die Energie der Röntgenbremsstrahlung.

3.2.3 Die charakteristische Röntgenbremsstrahlung

Wenn die freien Elektronen hingegen mit Elektronen der Atomhülle kollidieren, wird dabei ebenfalls ein Teil der Energie übertragen. Folglich können die freien, beschleunigten Elektronen nicht nur durch die Anziehungskraft des Atomkerns abgebremst werden, sondern auch mit der Wechselwirkung der Elektronen in der Atomhülle. Durch die dadurch erhöhte Energie des Elektrons in der Hülle kann dieses die Bindung innerhalb des Atoms verlassen und es wird folglich auf einer inneren Schale ionisiert. Auf die frei gewordene Stelle in der Schale wandert nun ein Elektron von einer weiter außen befindlichen Schale. Je weiter man sich in den Schalen nach außen begibt, desto kleiner wird der Betrag der Bindungsenergie der Elektronen. Beim Übergang von einer weiter außenliegenden Schale in eine Schale weiter innen wird Energie frei. Diese Energie verlässt wiederum das Atom als elektromagnetische Strahlung. In diesem Falle steht die Energie eines Röntgenquants in Abhängigkeit zur Differenz der Bindungsenergie in den unterschiedlichen Schalen. Zur charakteristischen Röntgenbremsstrahlung wird diese Strahlung dadurch, dass die Energie beim Wechseln der Schalen für jedes Atom spezifisch und einzigartig ist. Aus nachfolgender Gleichung ist ersichtlich, dass sich die Intensität der Strahlung I für die unterschiedlichen Bandübergänge quadratisch mit der Differenz zwischen der Kinetischen- ($T_{kin,e}$) und der Bindungsenergie (T_B) verändert.

$$I \sim (T_{kin,e} - T_B)^m$$

Formel 3.2-2 Intensität Röntgenbremsstrahlung

Dabei ist der Exponent m materialabhängig und für die dementsprechenden Bandübergänge unterschiedlich [13]. Der gängigste Anodenwerkstoff ist Wolfram. Für dieses Anodenmetall ist beispielsweise der Wert m beim Übergang auf die erste Schale m=1,9 und für den Übergang auf die zweite Schale m=1,7.

3.2.4 Prinzip der Computertomographie

Die kinetische Energie, die Ordnungszahl des Anodenmaterials und die Art der erzeugenden Teilchen beeinflussen maßgeblich die Ausbeute der Strahlung der erläuterten Varianten zur Erzeugung von Röntgenbremsstrahlung. Im Gegensatz zu α-Teilchen oder Protonen, die nicht einmal bei hohen Energien eine brauchbare Röntgenbremsstrahlung erzeugen, sind Elektronen in der Lage, auch bei verhältnismäßig niedriger Energie in Kombination mit schweren, absorbierenden Metallen, viele Röntgenphotonen zu erzeugen. Die Ausbeute der Röntgenphotonen ist proportional abhängig von der Ordnungszahl Z. Einen weiteren Einfluss auf das Emittieren von Röntgenstrahlung ist die Wärmeleitfähigkeit κ und der Schmelzpunkt T_{max} der jeweiligen Anodenmetalle. Die nachfolgende Tabelle 3.2-1 soll einen Überblick über die gängigsten Metalle für die Anodenzusammensetzung geben.

Element	Ordnungszahl Z	zulässige Temperatur T_{max} bei $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ Pa	Wärmeleitfähigkeit $\lambda \left[\frac{W}{cm\,K}\right]$	Festanoden	
				$ZT_{max}{}^{K}$	Reihenfolge
Cu	29	1032	3,98	119113	8
Mo	42	2167	1,38	125599	7
Ag	47	832	4,18	163450	4
Ta	73	2587	0,55	103868	9
W	74	2757	1,3	265223	1
Re	75	2557	0,71	136160	6
Os	76	2280	0,87	150754	5
Ir	77	2220	1,46	249572	3
Pt	78	1742	0,71	96472	10
Au	79	(1063)	3,14	263687	2
U	92	(1132)	0,25	26036	11

Tabelle 3.2-1 Verschiedene Anodenmaterialien klassifiziert durch Ordnungszahl, Temperatur und Wärmleitfähigkeit nach [14]

In Tabelle 3.2-1 kann man erkennen, dass es Elemente mit kleiner Ordnungszahl, hoher Schmelztemperatur und Wärmeleitfähigkeit gibt, die sich gleichermaßen als Anodenmaterial und somit als Röntgenemitter eignen. Es lässt sich eine Art Qualitätsmaß für die Tauglichkeit als Röntgenemitter aus der Ordnungszahl, der Schmelztemperatur und der Wärmeleitfähigkeit bilden, bei dem Wolfram als Anodenmaterial am besten abschneidet. Iridium und Gold stehen Wolfram allerdings kaum etwas nach [13]. Auf Basis dieser technischen Grundlage ist die Anwendung dieser Röntgenstrahlen aus der Medizin (Radiologie) und der Werkstoffprüfung und deren Grundlagenforschung nicht mehr weg zu denken.

Man unterscheidet bei der Aufnahme von durchleuchteten Untersuchungsobjekten in zwei verschiedene Arten. Man kann laut [15] das Untersuchungsobjekt im Röntgenstrahl drehen (axiale CT) oder den Röntgenstrahl um das Untersuchungsobjekt bewegen (digitale Tomosynthese). In der Werkstoff- und Bauteilprüfung wird für gewöhnlich das zu prüfende Untersuchungsobjekt im Röntgenstrahl gedreht.

Es ist darauf zu achten, dass das Untersuchungsobjekt von allen Richtungen gut durchstrahlbar ist und wenn möglich auch ungefähr dieselben Wandstärken besitzt. Es werden eine hohe Menge an unterschiedlichen Winkelpositionen des Untersuchungsobjektes bestrahlt und dessen Projektionen, mit Hilfe eines rechnergestützten Programmes, mathematisch rekonstruiert und in einen dreidimensionalen Volumendatensatz transformiert. Nach Hassler, Mohr und Müller [16] ist die Auflösungsqualität des CT-Systems maßgeblich von der Position des Untersuchungsobjektes zwischen Röntgenquelle und Detektor, der Größe des Detektorelements und der Größe des Röntgenbrennfleckes abhängig [16].

Bei der Computerlaminographie ist es möglich, jede einzelne Ebene scharf und mit einem hohen Röntgenkontrast abzubilden. Dies erfolgt durch eine rechnergestützte Verschiebung der Projektionsbilder, wodurch ein dreidimensionales Bild des Untersuchungsobjektes entsteht. Des Weiteren können bei der computergestützten Röntgenlaminographie hohe Auflösungen erreicht werden, da bei dieser Variante die Röntgenquelle lediglich auf einer Seite des Untersuchungsobjektes verbleibt und deshalb sehr dicht an das Untersuchungsobjekt heranfahren kann. Dieses Verfahren kommt häufig bei sehr großen Untersuchungsobjekten zum Einsatz, da eine axiale CT vom Bauraum her an ihre Grenzen stoßen würde und bei der Rotation um das Untersuchungsobjekt eine Kollision der Messanlage mit dem Untersuchungsobjekt unumgänglich wäre [17]. Jedoch benötigt man für die Bearbeitung der Aufnahmen Arbeitsrechner mit einer großen Rechen- und Speicherkapazität.

3.2.5 Computertomographie in der Werkstoff- und Bauteilprüfung

Wie vorstehend ausgeführt, ist die Computertomographie, aber auch die klassische Röntgenuntersuchung, in der Medizin und in der Industrie ein Standardverfahren als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die unterschiedlichsten Anwendungsgebiete. Dazu wird ein dreidimensionaler Datensatz erzeugt, der es ermöglicht, durch die unterschiedlichen Ebenen des Untersuchungsobjektes z.B. Veränderungen in Werkstoffsystemen nach einem bekannten Belastungsregime zu detektieren. Die größte Sicherheit bezüglich der Aussagengüte über den Zustand des Werkstoffes oder Bauteiles wird mit Referenzmessungen an nicht geschädigten Referenzproben erzeugt. Die Ortsauflösung der verwendeten CT-Messanlage ist dabei ein essentieller Faktor hinsichtlich der Tauglichkeit kleinste Strukturen auflösen zu können und dadurch sichtbar zu machen [16]. Anhand der Messzeit, der Ortsauflösung und der Größe des Untersuchungsobjektes kann wie in Tabelle 3.2-2 eine ungefähre Einteilung der CT-Anlagen durchgeführt werden. Der Untersuchungszweck spielt für die Auswahl der geeigneten CT-Anlagenvariante allerdings eine wichtige Rolle.

TYP	Typische Messzeit	Ortsauflösung	Typische Objektgröße	Anwendung
Sub-Mikro-CT	1-10 h	0,5-5 μm	1-10 mm	Mikrostruktur, Gefüge
Mikro-CT	0,1-2 h	5-100 μm	10-100 mm	Mikrostruktur, Funktion
Makro-CT	0,5-4 h	100-00 μm	100-700 mm	Grobstruktur, Funktion

Tabelle 3.2-2 Grobeinteilung von CT-Anlagen nach [16]

Für die Materialcharakterisierung, im Speziellen bei FVKs, ist die Ermittlung der Kennwerte der Ausgangsmaterialien von Relevanz. Die CT-Untersuchung ermöglicht es unter gewissen Randbedingungen z.B. die Faserorientierung, die Faserlängenverteilung und den Faservolumengehalt als Kenngrößen der unterschiedlichen Werkstoffkombinationen zu ermitteln. Wenn beispielsweise Einzelfilamente aufgelöst werden müssen, so ist eine sehr hohe Ortsauflösung notwendig, die nicht mit jeder CT-Anlage erreicht werden kann. Gemäß der erfolgten Grobeinteilung der CT-Anlagen ist es nur mit einem hohen Aufwand möglich, diese hohe Auflösung bei kompletten und komplexen Bauteilen zu erreichen. Deshalb werden Grundlagenuntersuchungen bei der Werkstoffentwicklung und bei der Qualifizierung neuartiger Messmethoden hauptsächlich an kleinen Probekörpern (Coupons) durchgeführt. Es ist bei FVKs zwingend notwendig, dass sich die Fasern gut von der Matrix bezüglich deren Röntgenkontrastes segmentieren lassen. Dieser materialspezifische Röntgenkontrast kann dabei stark variieren. Kohlenstofffasern im Vergleich mit Glasfasern weisen, auch aufgrund ihres meist deutlich kleineren Durchmessers, einen geringeren Röntgenkontrast auf. Dies ist der Grund, weswegen die Interpretationen bei CFK-Werkstoffen mit unterschiedlichen Lagenaufbauten und verschiedenen Werkstoffkombinationen schwerer ist als mit anderen FVKs. Darüber hinaus sorgen fertigungsbedingte Einschlüsse von Fremdmaterialien (z.B. Metallen) und Inhomogenitäten im Werkstoffverbund für erschwerte Bedingungen [16].

3.3 Schallemissionsanalyse im Speziellen

Dieses Kapitel soll in die Grundlagen der Schallemissionsanalyse einführen. Speziell wird eine Zusammenfassung bisheriger Forschungsarbeiten zum Thema Identifikation von Vorschädigungs-und Schädigungsmechanismen in FVK mittels der Schallemissionsanalyse dargelegt. Des Weiteren wird die Schallemissionsmesskette und die Funktion der Einzelkomponenten und Prozessschritte erklärt. Die Schallemission oder Acoustic Emission (AE) ist ein physikalisches Phänomen, welches im Allgemeinen zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen, der Schallemissionsanalyse, verwendet werden kann. Diese ist in der Lage, Defekte, Vorschädigungen und Schäden im Werkstoff und somit auch im Bauteil zu detektieren. Die Schallemission wird dabei in einem Festkörper ausgelöst, sobald elastische Energie in Form einer elastischen Welle freigesetzt wird. Hier ist auch der Unterschied zur klassischen Ultraschallprüfung zu finden, bei der man die Reaktion einer künstlich erzeugten und beliebig wiederholbaren Anregung im Werkstoff oder Bauteil misst. Somit muss bei der Schallemissionsprüfung keine Welle künstlich eingebracht werden. Die gemessene Welle entsteht durch den Defekt selbst. Dies kann durch kurzzeitige, sehr kleine Materialverschiebungen, beispielsweise durch ein Rückfedern im Werkstoff bei schnell ablaufenden Prozessen (z.B. Mikrorissbildung, Risswachstum, etc.), entstehen und erzeugt an der Oberfläche des belasteten Prüfobjektes eine akustische Welle (elastische Spannungswelle). Es handelt sich somit um ein passives Messverfahren, das eine Art von „Belastung“ im Prüfling benötigt, die Schallemissionsaktivitäten überhaupt erzeugt. Als Schallemissionsquelle wird dabei der physikalische Ausgangspunkt oder Ursprung des Schallemissionsereignisses beschrieben. Potentielle Schallemissionsquellen sind beispielsweise plastische Verformungen wie Versetzungsbewegungen, Phasenumwandlungen, Rissbildung, sowie Korrosionsvorgänge [18], [19]. Der AE-Aufnehmer, meist ein Piezosensor, nimmt ein durch die akustische Welle verursachtes elektrisches Signal auf, das als Schallemissionsereignis definiert wird. Dieses Schallemissionsereignis wird durch ein transientes Signal beschrieben. Charakteristisch für ein transientes Signal ist ein eindeutig abgrenzbarer Beginn und ein definiertes Ende (Abbildung 3.3-1 Transientes Signal nach [19]). Das Schallemissionsereignis bei einer Schädigung entsteht

durch eine ruckartige Mikroverformung im Innern des Festkörpers in Form einer Stufenfunktion mit überlagertem Einschwingverhalten Insbesondere weisen auch nichtmolekulare Stoffe, wie z.B. Kristalle beim Bruchvorgang Schallemission auf.

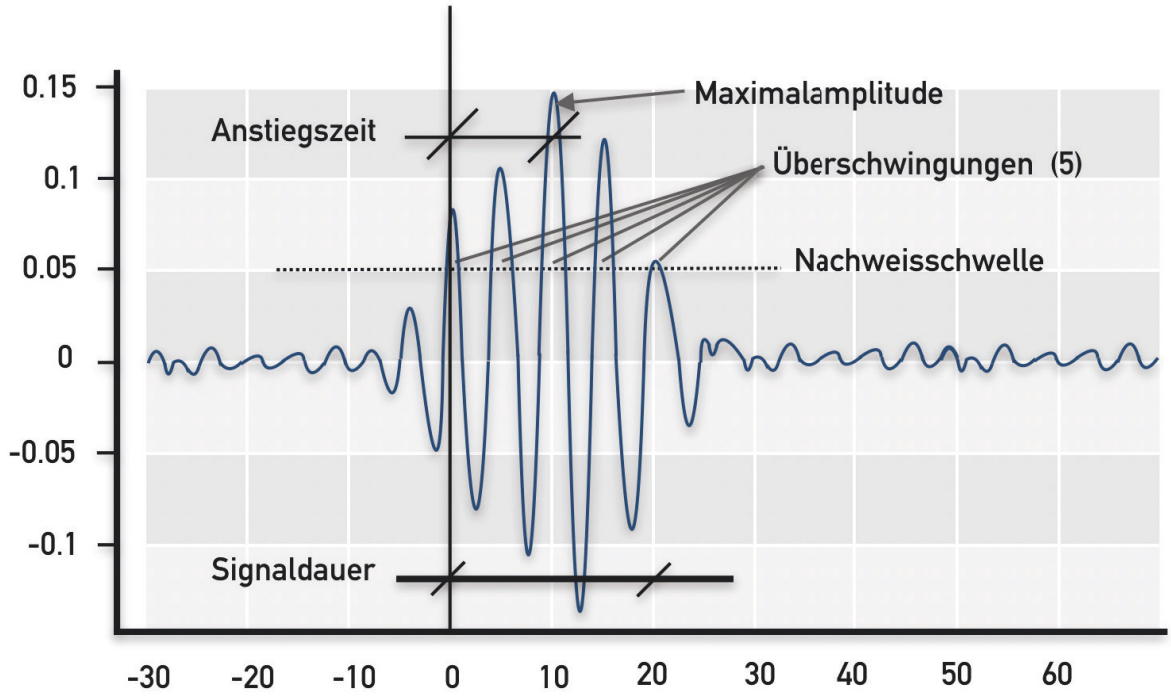


Abbildung 3.3-1 Transientes Signal nach [19]

Unterteilen lassen sich die Schallemissionsereignisse in Events und Hits. Falls das Schallemissionssignal an einem AE-Aufnehmer einen zuvor definierten Schwellwert übersteigt, wird dieses Schallemissionssignal vorerst als Hit erkannt und gewertet. Um die als Hit gewerteten Signale von etwaigen Störgeräuschen, wie beispielsweise EMV-Störungen abgrenzen zu können, werden verschiedene Schallemissionsmerkmale berechnet. Diese können unter anderem die Ankunftszeit (Zeit der ersten Überschwingung), die Maximalamplitude, die Anstiegszeit, die Signaldauer und die Anzahl der Überschwingungen, sowie die Energie und der RMS-Wert (Root Mean Square) sein. Der RMS-Wert wird auch als Effektivwert bezeichnet und kann zur Bestimmung des dauerhaften Hintergrundrauschens vor dem jeweiligen Hit herangezogen werden [19]. In der Datenanalyse und Aufarbeitung erfolgt nachgeschaltet die Trennung der Events von den Hits. Für diese Abgrenzung werden abermalig die oben erwähnten Schallemissionsmerkmale und die Betriebsdaten der Belastungsintervalle (z.B. Kraft-Wegsignale), die Geometrie des Bauteils und die daraus resultierende Schallgeschwindigkeit herangezogen. Abbildung 3.3-2 AE-Messkette nach [20] erläutert das Prinzipschema der Schallemissionsmesskette.

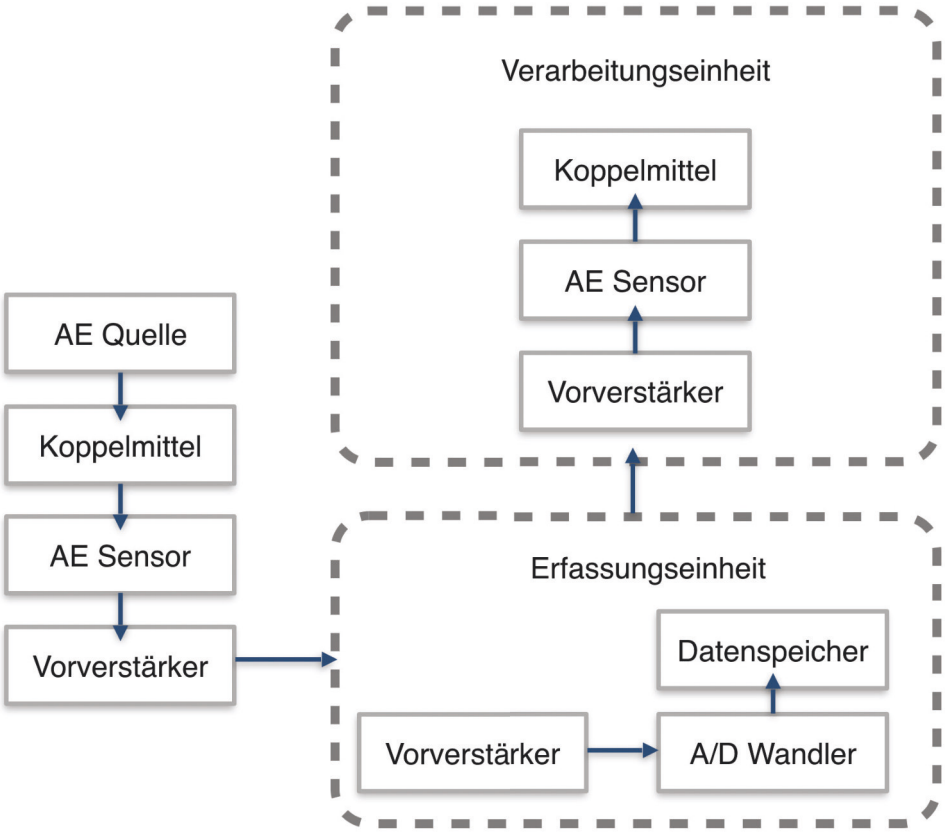


Abbildung 3.3-2 AE-Messkette nach [20]

Als AE-Aufnehmer werden hauptsächlich piezoelektrische Sensoren verwendet, die an Vorverstärker angeschlossen sind. Sie können große Amplituden ohne Übersteuerung aufnehmen und weiterverarbeiten. In der Erfassungseinheit wird ein Frequenzfilter zur Unterdrückung unerwünschter Störsignale verwendet und im nachgeschalteten Prozess werden die analogen AE-Signale durch den A/D-Wandler in digitale Signale umgewandelt. Für die weitere Verarbeitung der Daten gibt es verschiedene Softwaresysteme, die vom jeweilig verwendeten Messsystem abhängig sind. In der vorliegenden Arbeit wurde hauptsächlich für das Auslesen der Daten und für die Datenanalyse- und Auswertung eine vom Fraunhofer Institut für keramische Technologien und Systeme (IKTS) entwickelte Software angewandt. Bei der Darstellung der weiterverarbeiteten AE-Daten gibt es eine große Varianz und es kann grundsätzlich zwischen einer Einzeldarstellung des ausgewählten AE-Parameters oder einer über den Lokalisierungsort summierten oder gemittelten Darstellung gewählt werden. Darüber hinaus lassen sich die AE-Ereignisse bauteilspezifisch orten. Hierfür notwendig ist die Bestimmung des Quellortes jedes einzelnen AE-Ereignisses. Dies erfolgt durch die Auswertung der Laufzeitunterschiede der einzelnen an den Sensoren erfassten Signalen. Die Schallwellen, die sich bei planarer Betrachtung in isotropen Medien in konzentrischen Kreisen ausbreiten werden wie in Abbildung 3.3-3 Schallausbreitung im isotropen Medium nach [19] dargestellt, mit einer Zeitverzögerung von den Sensoren erfasst.

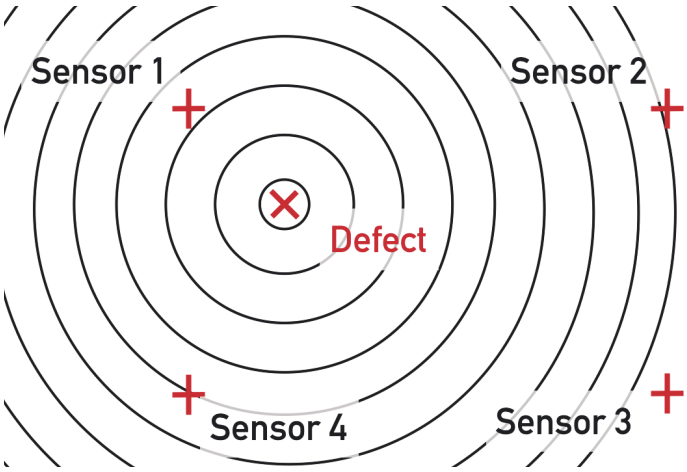


Abbildung 3.3-3 Schallausbreitung im isotropen Medium nach [19]

Dieses Phänomen ist ebenfalls die Basis zur Bestimmung der spezifischen Schallgeschwindigkeit des Werkstoffes, die für die Lokalisierung und der damit verbundenen Zuordnung der Schallemissionsereignisse als Events benötigt wird. Hierfür hat sich der Bleistiftminenbruch als zuverlässig wiederholbare Schallemissionsquelle bewährt. Die Schallemissionsquelle ist die nach seinen Erfindern Hsu und Nielsen benannte Hsu-Nielsen-Quelle, die durch den Bruch einer Druckbleistiftmine mit einem Führungsring, der einen definierten Winkel vorgibt, entsteht.

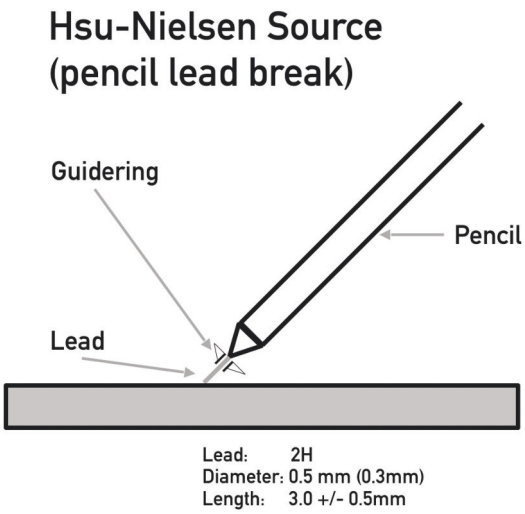


Abbildung 3.3-4 Schematische Darstellung Hsu-Nielsen Test nach [21]

Des Weiteren ist ein Härtegrad von 2H und ein Durchmesser von 0,3 mm oder 0,5 mm vorgegeben und die Sensorpositionen müssen definiert gewählt werden, um das vom Minenbruch verursachte Schallemissionssignal über die Differenz der Laufzeit zwischen mehreren (mindestens 3) Sensoren zur Ortung im Raum bestimmen zu können. Dabei ist die Schallausbreitung des Signals stark von der Bauteilgeometrie und von der jeweiligen Werkstoffkombination abhängig. Die Schallgeschwindigkeit ist beispielsweise bei Faserverbundwerkstoffen von den Dämpfungseigenschaften der Matrix aber auch von der Faserorientierung abhängig.

Grundsätzlich ist die Schallemissionsanalyse für alle konventionellen Werkstoffe als ZfP-Verfahren nutzbar. Vorauszusetzen ist, dass der Werkstoff bzw. das Bauteil mit Sensoren appliziert werden kann. Danach kann das Prüfobjekt passiv und ohne zusätzliche Maßnahmen überwacht werden und dessen Reaktion auf dynamische Prüflasten ermittelt werden. Diese Eigenschaft der Schallemissionsanalyse ist der Grund für eine Echtzeitüberwachung während eines laufenden Belastungstests. Als Nachteil der Schallemissionsanalyse kann die Empfindlichkeit des Messsystems gesehen werden. So müssen beispielsweise elektromagnetische Störungen oder durch Witterungsbedingungen hervorgerufenen Störungen weitestgehend vermieden werden. Außerdem gibt es bisher keine zugängliche Datenbank für Bewertungskriterien der Events oder charakteristische Schallemissionsereignisse von unterschiedlichen Werkstoffen je nach Schädigungsart. Deshalb basiert die Auswertung und Weiterverarbeitung der Schallemissionssignale hauptsächlich auf der Erfahrung des Prüfers/Auswerters [19].

3.3.1 Besonderheit der Schallemissionsmessung an komplexen Strukturen/Bauteilen

Die Ausbreitung der elastischen Wellen in festen Medien (isotrope Festkörper) erfolgt nicht ohne eine Art Verlust der Signalstärke. Dieser Verlust wird als Dämpfung bezeichnet. Frühere Untersuchungen von Prosser zeigten, dass selbst im Labormaßstab Laminate mit einer höheren Anzahl an Lagen Schallemissionssignale mit größerer Amplitude erzeugen [22]. In diesem Zusammenhang gibt der Dämpfungskoeffizient α die Dämpfungseigenschaften von Materialien an. Die akustische Dämpfung wird mit der Verhältniszahl Dezibel (dB) angegeben, um die Dämpfungseffekte besser darstellen zu können und berechnet sich aus dem Ausschwingvorgang der Amplitude u_1 und u_2 von einer elastischen Welle zwischen zwei verschiedenen Schallerfassungspunkten wie folgt:

$$\text{Dämpfung} = 10\log(e^{-\alpha(u_1-u_2)})^2\text{dB}$$

Formel 3.3-1 Dämpfung

Im Zusammenhang mit der Schallemissionsanalyse gibt es gemäß Prosser fünf Hauptdämpfungsarten, die nachfolgend näher erläutert werden [22]:

- Geometrische Ausbreitung
- Thermoelastische und Akhieser-Dissipation
- Dispersion (Abhängigkeit der Welleneigenschaft von der Wellenlänge)
- Streuung
- Dissipation in benachbarte Medien

Nahe der Schallemissionsquelle, im sogenannten Nahfeldbereich, hat die geometrische Ausbreitung einen sehr großen Anteil an der Dämpfung der Schallsignale. Der Grund hierfür sind sphärische Energieeinstrahlungen in das Festkörpervolumen. Diese Einstrahlungen resultieren in einem Abfall der Energie pro Flächenwinkel mit umgekehrtem Ausbreitungsabstand r. Falls es sich um Lamb-Wellen handelt, fällt die dämpfende Wirkung im Nahfeldbereich stärker aus, da die elastische Wellenenergie in die verschiedenartigen Wellenmoden (symmetrisch und antisymmetrisch) aufgeteilt wird [12]. Dies liegt unter anderem an der Geschwindigkeitsdispersion, die später noch näher beschrieben wird. Gemäß Prosser wird bei Lambwellen der typische, aus der geometrischen Ausbreitung resultierende Abstand durch $r < 4{,}34/\alpha$ berechnet [22].

Im Fernfeld hingegen lässt sich der Dämpfungsanteil der Schallemissionsquelle zu großen Teilen zwei verschiedenen Mechanismen zuordnen. Bei Raumtemperatur dämpfen somit der thermoelastische Mechanismus und der Akhieser-Mechanismus. Die thermoelastische Dämpfung hat ihre Ursache in einer irreversiblen Wärmeleitung, die bei Kompressionsvorgängen während der Ausbreitung der elastischen Wellen entsteht. Der Akhieser-Mechanismus basiert auf einem Ungleichgewicht der thermischen Schallwellen (Phononen). Die Störung des Gleichgewichtes kommt von der Ausbreitung einer kohärenten Schallwelle, die die Gleichgewichtsposition der Phononen beeinflusst und führt zu einem dissipativen Energiebeitrag. Somit entsteht eine Dämpfung der Schallemissionswellen in isotropen Festkörpern durch den thermoelastischen und Akhieser-Mechanismus, der proportional zur Kreisfrequenz ω^2 ist [12]. Dabei ist $\omega = 1$ rad/s oder anders ausgedrückt $\omega = 2\pi f$.

Bei anisotropen Festkörpern gibt es jedoch zusätzlich noch einige Effekte, die eine dämpfende Wirkung auf die Ausbreitung der geführten Wellen ausüben. Beispielsweise entsteht bei Lamb-Wellen durch räumliche Dispersion und Frequenzdispersion (Wellenanteile haben unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten) dämpfende Wirkung der Schallemissionssignale [12]. Dabei wird die Dämpfung, die durch die räumliche Dispersion entsteht, durch die Abhängigkeit des Wellenvektors und der dazu gehörenden Phasengeschwindigkeit bestimmt (frequenzabhängige Phasengeschwindigkeit bei Lamb-Wellen). Die dämpfende Wirkung durch die Frequenzdispersion infolge der Ausbreitung von nicht monochromatischen Wellenpaketen ist inhärent. Die am Quellort der Schallemission entstehenden Lamb-Wellen besitzen für gewöhnlich mehr als eine Frequenz und dies führt zu unterschiedlich schneller Ausbreitung der Signalbestandteile. Da sich die Energie der Welle zusätzlich auf einen größeren räumlicheren Bereich verteilt, geht dies mit einem weiteren Amplitudenverlust einher. Die unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften der verschiedenen Moden sind bei der Ausbreitung von elastischen Wellen in FVKs noch größer als in isotropen Werkstoffen. Bei FVKs ist die Dämpfungseigenschaft von antisymmetrischen Moden noch höher als die Dämpfung der symmetrischen Moden [22].

Elastische Wellen werden im Allgemeinen durch Fehlstellen, beispielsweise herstellungsbedingt, oder durch andere Inhomogenitäten beeinflusst. Die daraus resultierenden Streuungen der elastischen Wellen tauchen z.B. an Kornstrukturen bei metallischen Werkstoffen, an Fasern bei FVKs und bei Hohlräumen, die das für die Welle wichtige Ausbreitungsmedium unterbrechen, auf. All diese Unterbrechungen des Ausbreitungsmediums führen mal mehr und mal weniger stark zu Dämpfungseffekten, die bei der Analyse von Schallemissionsmessungen an FVKs mit einbezogen werden müssen.

Sowohl bei Schallemissionsmessungen auf Couponebene als auch bei Messung auf komplexeren Strukturen wie Bauteilen oder Komponenten breiten sich die Schallemissionssignale innerhalb des Prüflings aus. Der Prüfling muss dabei an oder mit Werkzeugen und Vorrichtungen an diversen Versuchsaufbauten befestigt werden. Es kommt folglich zu einer Teilübertragung des Schallemissionssignals auf benachbarte Medien, wie zum Beispiel Vorrichtungen und Steuereinheiten von Prüfständen. Dies ist durch Verluste des Signals durch die Reflektion oder Teilreflektion der Welle an umliegenden Medien zu begründen. Teilweise sind diese Verluste in einer Größenordnung, womit sie den Dämpfungsanteil der Schallemissionswelle hauptsächlich verursachen [12]. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass sich die Informationen der Schallemissionssignale, welche sich bei der

Entstehung und oder Anregung der Signale bilden und in der Frequenz- und Amplitudenzusammensetzung zu finden sind, während der Ausbreitung verändern. Dies schränkt den Abstand der Erfassung eines solchen Signals zum Signalursprung ein.

Im folgenden Unterkapitel wird speziell auf den Stand der Technik hinsichtlich der Schallemissionsanalyse an CFK-Materialien eingegangen. Zusätzlich werden besondere Effekte behandelt, die für die Anwendung der Schallemissionsanalyse für Faserverbundwerkstoffkunststoffe relevant sind.

3.3.2 Bisherige Erkenntnisse der Untersuchungen von CFK-Strukturen mit der Schallemissionsanalyse

Bereits in den 1950 Jahren erforschte Joseph Kaiser das akustische Verhalten von Metallen unter Belastung. Der nach ihm benannte Kaiser-Effekt beschreibt das „Ausbleiben von detektierbarer Schallemission bis die vorangegangene maximale Belastung überschritten ist“ [19]. Konkreter bedeutet das, dass ein Körper bei einem erstmaligen, ausreichend hohen Lasteintrag plastisch reagiert, danach bei einem erneuten Lasteintrag im ersten Schritt bis zum Erreichen der vorherigen Laststufe elastisches Verhalten aufweist. Folglich treten bei einem wiederholenden Lasteintrag unter der zuvor eingebrachten Maximallast keine Schallemissionsaktivitäten auf. Für isotrope Werkstoffe ist dieses Schallemissionsverhalten bei Lasteintrag weitestgehend bestätigt und es wurden bis zum heutigen Tag zahllose weitere Forschungsarbeiten über die Schallemissionsanalyse für unterschiedlichste Werkstoffe erstellt.

Zusätzlich zum Kaiser-Effekt verfügen insbesondere FVK mit dem Felicity-Effekt ein weiteres spezifisches Merkmal. Der Felicity-Effekt ist auch als Felicity-Ratio (FR) bekannt, der das Vorschädigungsverhältnis beschreibt. Er beinhaltet, dass die Schwere eines zuvor eingebrachten Schadens sich auf die nachfolgende Last auswirkt und wird folgendermaßen gebildet:

$$FR = \frac{Belastung\ beim\ Beginn\ der\ Schallemission}{vorherige\ maximale\ Belastung}$$

Formel 3.3-2 Felicity-Ratio

Somit können Schallemissionen vor allem bei zyklisch oder stufenweise gefahrenen Belastungsversuchen bereits vor Erreichen der vorherigen Laststufe auftreten [23]. Aus der Bildung dieses Verhältnisses lassen sich zwei Kernaussagen treffen. Ist das gebildete Verhältnis kleiner 1, so ist der Faserverbund in einem kritischen Zustand. Wenn hingegen der Wert des Verhältnisses größer 1 ist, treten erst nach dem Erreichen der vorherigen maximalen Last weitere Schädigungen des Werkstoffes auf. Es ist somit möglich, die Schallemissionsereignisse bezüglich des Vorschädigungsverhältnisses auszuwerten, was wiederum Schlussfolgerungen hinsichtlich der Restlebensdauer des Bauteiles erlaubt.

J. Bohse untersuchte einzelne Schädigungsmechanismen durch die Schallemissionsanalyse an FVK [25], [26]. Er betrachtete beispielsweise unterschiedliche Bruchmoden an glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), die durch gezieltes Versagen beim Double Cantiliver Beam Test, dem End Notched Flexure Test und dem Mixed Mode Bending Test hervorgerufen wurden, um die verschiedenen Delaminationsmoden zu provozieren. Der Double Cantilever Beam Test ruft hierbei hauptsächlich Schäden der ersten Mode hervor, der End Notched Flexure Test Brüche der zweiten Mode und der Mixed-Mode Bending Test erzeugte eine gemischte

Bruchmode. Ein Zugmodus, bei dem die beiden Rissflächen direkt auseinandergehen, wird als Mode I bezeichnet. Die Mode II charakterisiert einen Schermodus, bei dem die Rissflächen senkrecht zur Risskante gleiten. Der lokale Torsionsmodus wird mit dem Mode III beschrieben. Für diese Messungen wurde an beiden Probenenden jeweils ein Schallemissionssensor appliziert, um die lineare Ortung der Schallemissionsereignisse realisieren zu können. Er stützte sich bei seinen Auswertungen auf die Frequenzanalyse und grenzte dadurch in Kombination mit der Ortung der Schallemissionsquelle einen Frequenzbereich für Schallemissionen durch Matrixversagen von 100 – 350 kHz und einen Frequenzbereich durch Faserversagen von 350 – 700 kHz ein.

Eine differente Festlegung der Frequenzbereiche der Schallemissionsereignisse hatte vorab de Groot bei seiner Untersuchung an Carbon/Epoxy-Composites folgendermaßen bestimmt [27]: Matrixbruch zwischen 90 und 150 kHz, Interfaceversagen (Debonding und Pull-Out) zwischen 180 und 310 kHz und Faserbruch größer 300 kHz. Allerdings detektierte de Groot Schallemissionssignale um 540 kHz, die in seiner Arbeit nicht näher erläutert werden. Bei der Untersuchung der Auswirkung des Sensorabstandes zur Schallemissionsquelle stellte Ni die Frequenzanalyse der Amplitudenanalyse gegenüber [28]. Die Untersuchungen zeigen, dass die Frequenz der Schallemissionsquelle im Vergleich zur Amplitude vom Sensorabstand weitgehend nicht beeinflusst wird. Es ergaben sich folgende Beziehungen hinsichtlich der unterschiedlichen Schädigungsarten: Matrixbruch kleiner 100 kHz, Debonding zwischen 200 und 300 kHz und Faserbruch zwischen 400 und 450 kHz. Die Untersuchungen von Ni wurden allerdings an einzelnen eingebetteten Faser und Fasersträngen durchgeführt, wodurch der Einfluss des Faserverbundes im klassischen Sinne nicht mit einbezogen wurde. Untersuchungen von Eaton zeigten, dass der Frequenzbereich für Matrixversagen im niederfrequenten Bereich (kleiner 150 kHz) und für das Faserversagen im hochfrequenten Bereich (größer 300 kHz) liegt [29]. Über den dazwischenliegenden Frequenzbereich trifft Eaton keine Aussage. Die Identifizierung einzelner Schädigungsquellen durch den Einsatz neuronaler Netzwerke wurde in der Dissertation von Ativitavas behandelt [30].

Er benutzt typische, spezifische Schallemissionsparameter (z.B. Hits, Events, E_{abs}, $E_{abs\text{-}cum}$) bei bekannten Versagensmechanismen als primäres Netzwerk, um das sekundäre Netzwerk durch zusätzliche Versuchsdaten zu „trainieren“. Auf die spezifischen Schallemissionsparameter wird in Kapitel 3.3.4 näher eingegangen. Somit ist es dem sekundären Netzwerk möglich, aus den vom primären Netzwerk ausgegebenen Schallemissionsparametern, weitere Zusammenhänge herzustellen. So können unterschiedliche Schädigungsmechanismen in Cluster eingeteilt und eine Mustererkennung abgeleitet werden. Dieser Ansatz gilt ausschließlich für die in Ativitavas´ Versuchsreihe ausgewählte Versuchskonfiguration inklusive Materialkombination und Probengeometrie und ist nicht für andere Werkstoffkombinationen und Probengeometrien reproduzierbar. Deshalb sind die neuronalen Netzwerke nicht allgemein „trainierbar“, sondern benötigen zusätzliche

Versuchsdaten. Ativitavas trifft in seiner Dissertation keine Aussage über die Übertragbarkeit seiner Versuchsbedingungen und- ergebnisse auf andere Werkstoffsysteme und Probengeometrien. 2004 führte Rowland eine Untersuchung hinsichtlich des Schädigungsverhaltens eines F1-Monocoques durch [23]. Er konzentrierte sich bei seiner Auswertung hauptsächlich auf die Anzahl der Hits und deren Energiesummen. Die Betrachtung der Hits und Energiesummen lieferte jedoch nur eine Abschätzung der aufgetretenen Schädigungsmechanismen.

Eine Kombination von unterschiedlichen Analysearten zur Erkennung von verschiedenen Schädigungsmechanismen wählten Hufenbach und Richter [31]. Sie konzentrierten sich dabei auf die Analyse von Sprüngen in der Energiesumme, der Schallereignisaktivität und der Amplitudenanalyse. Sie stellten fest, dass ein stufenweiser Schädigungsfortschritt bis hin zu einem kritischen Schädigungsstadium dokumentierbar ist. Es gelang ihnen, das finale Versagen des Prüfkörpers durch einen stark exponentiellen Anstieg der Schallemissionsaktivitäten deutlich vor dem eigentlichen Versagen vorherzusagen. Als Ergebnis stellten sie verschiedene Schädigungsphasen bei der Belastung eines CFK-Verbundmaterials bis hin zum Versagen dar. Rückwirkend lassen sich dadurch Rückschlüsse zu einzelnen Schädigungsphasen und Prozessen inklusive deren spezifisches Schallemissionsverhalten ziehen. Allerdings ist es durch diese Art der Verarbeitung und Auswertung der Schallemissionssignale nicht möglich, einzelne Schädigungsmechanismen zu identifizieren [31].

Der erste Bereich wird als passive Rissphase bezeichnet. Darin finden sich einzelne Schallemissionen mit geringer Energie und niedriger Amplitude, die meist auf herstellungsbezogene Inhomogenitäten im Werkstoff (z.B. Faserondulation) schließen lassen. Der zweite Bereich hingegen weist Schallemissionsereignisse mit konstanter Energiefreisetzung und mittlerer Amplitudenstärke auf. Dies ist ein Indiz für erste Rissbildungen in der Matrix. Gemäß den Erkenntnissen von Hufenbach und Richter kommt es zu den ersten Schädigungsprozessen im Werkstoff, wenn diese Rissbildungsgrenze überschritten wird. Der dritte Bereich ist ebenfalls von einer kontinuierlichen Energiefreisetzung gekennzeichnet und die Anzahl der Schallemissionsereignisse wächst linear. Dies deutet auf eine neue Schädigung der Matrix durch Rissbildung hin. Der nachfolgende Bereich wird von Schallemissionsereignissen dominiert, die einen erhöhten Energie- und Amplitudengehalt aufweisen und somit auf die Freisetzung von erhöhter akustischer Energie schließen lassen. Hier werden zum ersten Mal verhältnismäßig viele Schallemissionssignale mit hoher Amplitude emittiert, die durch eine große Anzahl von Schäden im Werkstoff hervorgerufen werden. Gemäß den Untersuchungen führen diese Schäden zu einer Art Risssättigung zwischen den Einzelschichten des Laminates. Die fünfte und letzte Schädigungsphase wird durch eine abrupte, progressive Steigerung des Schallemissionsverhaltens charakterisiert. Diese sagt das finale Versagen voraus. Jedoch konnten hier keine Einzelbruchmechanismen identifizieren werden.

Einen anderen Ansatz zu Schallemissionsanalyse von CFK-Werkstoffen wählten Eaton und Holford [29]. Sie analysierten die Wellenformen und bedienten sich dabei der FFT. Im Fokus ihrer Untersuchungen lagen der Einfluss von Sensorabstand und Geometrie der Proben auf das Frequenzverhalten. Um unterschiedliche Versagensmechanismen zu provozieren, wählten sie für Zugversuche und Biegeversuche unterschiedliche Lagenaufbauten. Die Zugproben wurden mit [0°] und $[0°/90°]_{2S}$ Aufbau gewählt und am Ende der Proben wurden jeweils Aluminiumaufleimer appliziert, um die Probe zu verstärken und um Störgeräusche zu minimieren. Die Biegeproben wurden mit einem Lagenaufbau von $[0°/90°]_4$ und $[\pm45°]_4$ hergestellt. Bei den Biegeversuchen wurden zwei AE-Sensoren verwendet, während für die Zugversuche lediglich ein AE-Sensor appliziert wurde. Dies ist auch der Grund, weswegen bei den Zugversuchen keine AE-basierte Ortung der Schäden möglich war. Auch bei den Biegeversuchen wurde keine lineare Ortung der Schäden durchgeführt.

Abschließend lässt sich zu Eatons Versuchen sagen, dass sich die Zuordnung des niederfrequenten Bereiches zum Matrixversagen und das hochfrequente Spektrum zu den

faserdominierenden Versagensmechanismen bestätigen lassen. Im Detail konnte dabei für die verschiedenen Schädigungsarten, wie Matrixversagen, Faser-Matrix-Ablösung und Faserbrüchen, genauere Frequenzbereiche ermittelt werden. Für Matrixversagen wurde der Bereich von 0 − 150 kHz, für Faser-Matrix-Debonding oder Pull-Out der Bereich von 150 bis 400 kHz und für den Faserbruch ein Frequenzbereich von mehr als 400 kHz festgestellt. Gestützt wurde diese These dadurch, dass für den $(0, 90)_{2S}$ Lagenaufbau hauptsächlich Matrixbrüche und Debonding aufgenommen wurden, was aus den überwiegend niederfrequenten AE-Signalen geschlussfolgert wurde. Für das Laminat mit dem $[0°]_8$ Aufbau wurden hingegen hochfrequente Signale aufgezeichnet, was überwiegend auf Faserbrüche schließen lässt.

In seiner Dissertation und weiteren Arbeiten analysierte Sause [32] die Identifikation unterschiedlicher Schädigungsmechanismen durch die Mustererkennung und wendete dabei unterschiedliche Analysemethoden an. Eingehend erforschte er die akustischen Verhaltensweisen von beschichteten CFK-Proben. Die Auswertung der Schallemissionsdaten fand hierbei amplituden- und energiebasiert statt. Diesen Ansatz wählte er ebenfalls zur Clusterung der AE-Ergebnisse. Ein Abgleich der Ergebnisse der Schallemissionsanalyse erfolgte durch Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop. In nachfolgenden Arbeiten legte Sause vorerst den Schwerpunkt auf die Simulation der Ausbreitung akustischer Signale von AE-Quellen, um anhand dieser Erkenntnisse eine Clusteranalyse zu entwickeln. Zur Clusterung verwendete er eine Kombination aus Energieparameter, Signalanzahl, FFT und die neu entwickelte Weighted Peak Frequency die meist gegenüber der Partial Power abgetragen wird. Der Abgleich erfolgte in diesem Zusammenhang anhand von experimentell ermittelten Schallemissionsergebnissen, die u.a. von Zug- und 4PB-Versuchen stammten. Die Weighted Peak Frequency setzt sich zusammen aus einer Parameterextraktion im Zeit- und Frequenzraum (Abbildung 3.3-5) und der Berechnung nach [20]:

$$f_{WPF} = \sqrt{f_{Peak} \cdot f_{centroid}} \textbf{ und } f_{centroid} = \frac{\int f \times \tilde{U}(f) df}{\int \tilde{U}(f) df} \textbf{ mit } \int_{f_1}^{f_2} \tilde{U}^2(f)\, df\ *$$

*Partial Power 1: f_1=0 kHz; f_2=150 kHz; Partial Power 2: f_1=150 kHz; f_2=300 kHz

Partial Power 3: f_1=300 kHz; f_2=450 kHz (Gemäß der charakteristischen Frequenzspektren)

Formel 3.3-3 Weighted Peak Frequency

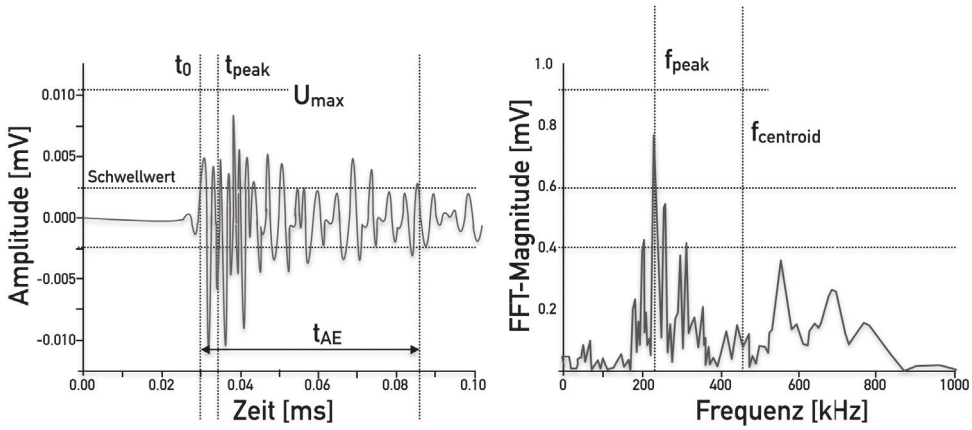


Abbildung 3.3-5 Parameterextraktion im Zeit Frequenzraum nach [32]

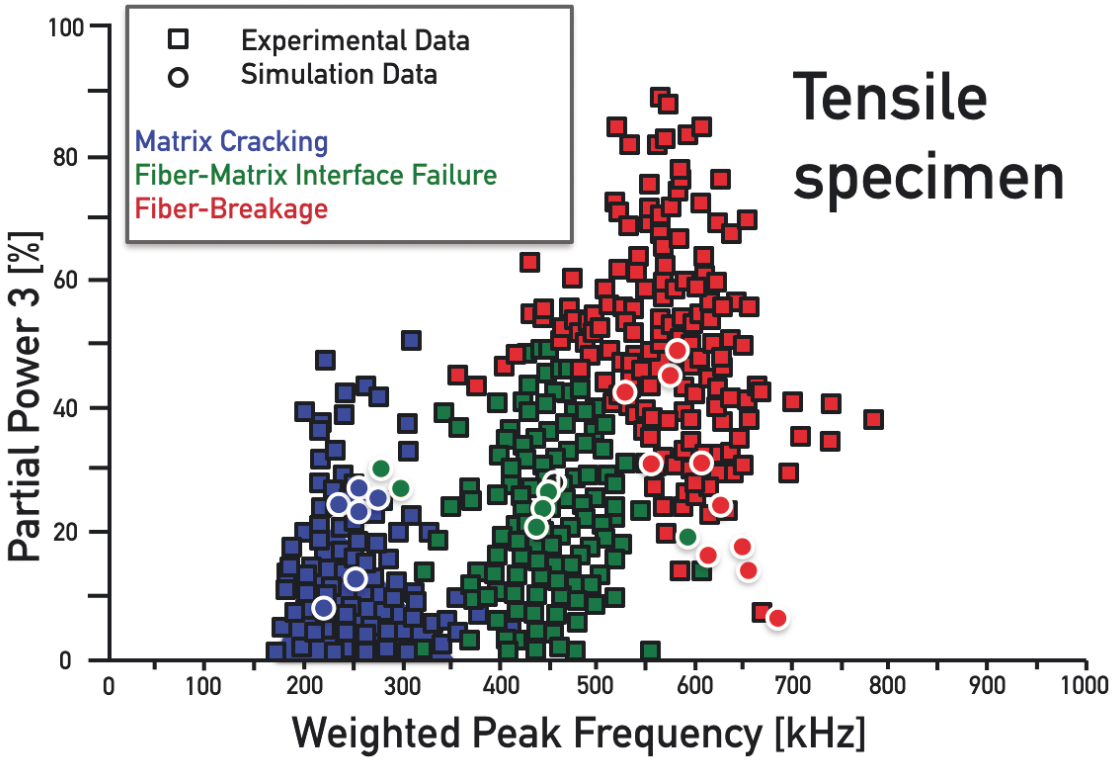


Abbildung 3.3-6 Vergleich Clusterung Simulation und Experiment nach [12]

Zum Schluss stellte er die Ergebnisse von Simulation, Clusterung und Experimenten den Ergebnissen der mikroskopischen Untersuchungen gegenüber (Abbildung 3.3-6). Dabei erreichte Sause, die frequenzbasierten Matrix-, Interface- und Faserspektren noch genauer zu differenzieren als aus vorherigen Arbeiten bekannt war. Die Überschneidungen der Matrix- und Interfacespektren konnte er allerdings nicht vollständig auflösen und wies deshalb im Ausblick auf eine Weiterentwicklung der verwendeten Algorithmen hin. Einen starken Einfluss auf die Überlappung haben jedoch auch die Probengeometrie, der Abstand des Sensors zur AE-Quelle und der Materialaufbau der Proben. Durch die Modalanalyse (numerische oder experimentelle Bestimmung des dynamischen Verhaltens von Systemen; modale Parameter sind u.a. Eigenschwingungsform, modale Dämpfung, modale Masse, Eigenfrequenz) konnten Eaton und May die Wellenmoden bei ihren Untersuchungen an CFK-Werkstoffen detaillierter erforschen [33]. Sie betrachteten dabei die beiden Wellenmoden eines Quellsignals genauer. Für diese detailliertere Untersuchung arbeiteten Sie das Abgrenzungskriterium MAR (measured amplitude ratio) heraus, welches sich aus dem Verhältnis der dementsprechenden Maximalamplitude des S_0 bzw. A_0 Modes bei der Untersuchung der einzelnen Wellenformen bildet. Die Berechnungsformel kann [33] entnommen werden.

Die daraus entstehenden MAR-Werte kleiner 100 lassen auf out-of-plane Wellenbewegungen schließen und die MAR-Werte größer 100 auf in-plane Wellenbewegungen, was eine genauere Bestimmung der Art der Schallemissionsquelle möglich macht. Die verschiedenen Wellenbewegungen geben zusätzlich noch einen Hinweis auf unterschiedliche Schadensmechanismen. Folglich lassen sich out-of-plane Wellenbewegungen Delaminationen zuordnen und in-plane Wellenbewegungen sind ein Indiz für Matrixversagen, Debonding und Faserriss.

Bei den experimentellen Untersuchungen dazu brachen Eaton und May die Belastung der Probe nach den ersten signifikanten AE-Signalen (Signal mit einer Amplitude von mindestens 100 dB) ab, um diese dann zu röntgen. Das Ergebnis der Röntgenuntersuchungen in Korrelation zu den gemessenen AE-Parametern ist, dass eine schematische aber nicht genau auflösende Unterscheidung von Matrix- und Interfaceversagen durch MAR dargestellt werden kann. Zusätzlich unvorteilhaft an dieser Methode zur Unterscheidung der Versagensart ist die hohe Anfälligkeit bezüglich Störgeräuschen.

In einer weiterführenden Arbeit bearbeitete Sause den Einfluss der Signallaufzeiten in Bezug auf den AE-Quellmechanismus [34]. Es ist die Fortsetzung seiner Dissertation auf Basis der Mustererkennungsverfahren und Frequenzparameter mit dem Ergebnis, dass die exakte Wiederholbarkeit der Sensorankopplung eine hohe Auswirkung auf die Überlagerung bei der Klassifizierung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen hat. Die Genauigkeit der Klassifizierung wird darüber hinaus zusätzlich durch den Sensorabstand zur AE-Quelle beeinträchtigt, wie in Abbildung 3.3-7 zu sehen ist.

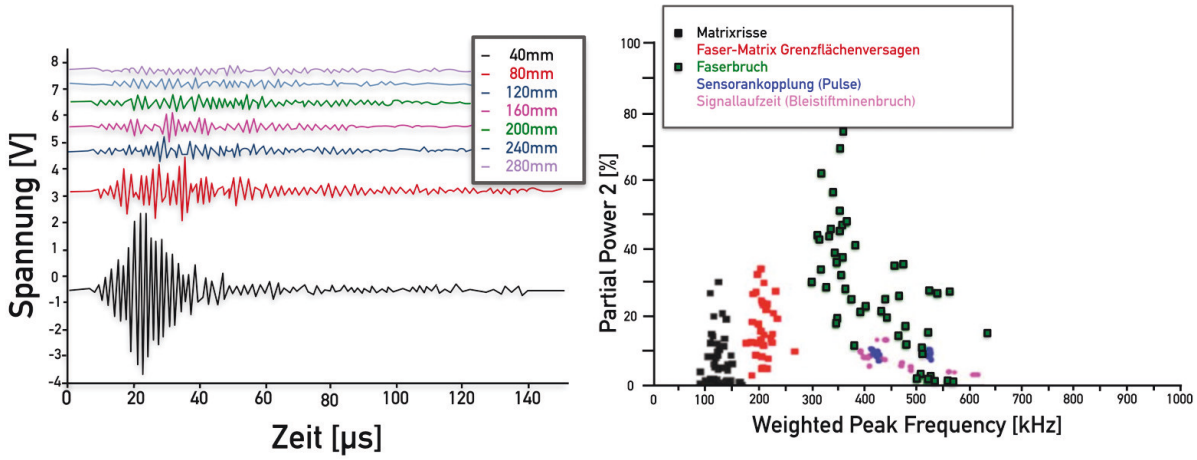


Abbildung 3.3-7 Schallemissionssignale in unterschiedlichen Abständen zum Sensor (links); Vergleich Sensorabkopplung und Signallaufzeit mit Signalparameter (rechts) nach [34]

Einen außerordentlichen Ansatz zur schallemissionsbasierten Detektion von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen lieferte Richler et al, welcher konkrete Schädigungsarten von Faserkunststoffverbunden auf mikroskopischer Ebene erzeugte [35]. Er wählte dafür einen vereinfachten Versuchsaufbau, bei dem er das Matrixversagen durch die Belastung von reinem Matrixmaterial untersuchte, durch Einbetten einer Einzelfaser in einen Matrixtropfen das Faser-Matrix-Debonding charakterisierte und den Faserbruch einer Einzelfaser aufzeichnete. So betteten sie eine Einzelfaser in einen Matrixtropfen. Hier musste zwischen zwei Einbettlängen unterschieden werden. War die kritische Faserlänge kleiner als die Einbettlänge, wurden Signale des Faser-Matrix-Debonding aufgezeichnet, wohingegen bei einer Einbettlänge größer der kritischen Faserlänge ein Faserbruch erzeugt und gemessen wurde. Für das reine Matrixversagen wurden Proben in einer axialsymmetrischen Sanduhrform hergestellt. Er trennte somit die unterschiedlichen Versagensarten und betrachtete diese einzeln. Bei der Signalanalyse verwendete er die Darstellung des Frequenzgehaltes und der Signalamplitude in Relation zum zeitlichen Verlauf. Die verschiedenen Signalamplituden sind hier auf die unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften der jeweiligen Welle und der Theorie nach den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zuzuordnen. Mit der Choi-Williams-

Transformation überführte er die AE-Signale in den Zeit-Frequenzraum. So lässt sich der Zeitpunkt genau bestimmen, bei dem ein gewisser Frequenzgehalt vorliegt, was bei einer herkömmlichen Fourier-Transformation nicht möglich ist. Eine detaillierte Herleitung der Choi-Williams-Transformation ist Choi Williams zu entnehmen.

Es fällt auf, dass die Frequenzmaxima der Wellenzüge von Faserbruch und Faser-Matrix-Debonding versetzt sind. Das Faser-Matrix-Debonding hat seine stärkste Ausprägung bei ca. 350 kHz und der Faserriss bei ca. 500 kHz. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass das Frequenzmaximum des Faserrisses bei ca. 500 kHz liegt, was durch die sanduhrförmige Geometrie des Matrixmaterials begründet wird, die sich in der FEM-Simulation als eine Art Frequenzfilter herausstellt. Man kann zusätzlich bei den unterschiedlichen Schädigungsarten die unterschiedlichen Dämpfungseigenschaften der Amplitudenverläufe erkennen, wobei die charakteristischen Dämpfungseigenschaften lediglich auf den gewählten Versuchsaufbau zu beziehen sind. Richler lieferte folglich den Nachweis auf mikroskopischer Ebene, dass es Unterschiede bei den jeweiligen Schädigungsmechanismen im Frequenz- und Zeitspektrum gibt. Es gelang ihm wegen des speziell gewählten Versuchsaufbaus jedoch nicht, einen Übertrag der Erkenntnisse hinsichtlich der Zuordnung unterschiedlicher Schädigungen auf komplexe CFK-Verbunde zu leisten. Radlmeier bearbeitet in seiner Dissertation die Auswertung und Analyse der symmetrischen (S_0) bzw. asymmetrischen (A_0) Grundmoden und die Lokalisierung der AE-Quelle [36]. Er konzentriert sich auf die gängigen AE-Parameter, sowie die Analyse des Frequenzspektrums.

Die nachfolgende Tabelle 3.3-1 soll einen Überblick und eine Zusammenfassung über einige der bisher durchgeführten Untersuchungen zur Detektion und Einteilung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen an faserverstärkten Kunststoffen geben.

Name	Jahr	Untersuchung	Werkzeug	Ergebnis
P. de Groot [27]	1995	Frequenzspektren für Carbon/Epoxy-Komposite	Frequenzanalyse	Frequenzspektrum: Matrixversagen: 90-150 kHz; Interfaceversagen: 180-310 kHz Faserversagen: >350 kHz
Q. Ni [28]	2002	Einfluss des Sensorabstandes zur AE-Quelle	Amplituden- und Frequenzanalyse	Frequenzspektrum: Matrixversagen: <100 kHz Interfaceversagen: 200-300 kHz Faserversagen: 400-500 kHz
N. Ativitavas [30]	2002	Identifikation von Schädigungsquellen	Neuronale Netzte, Amplitudenanalyse	Ansätze der Clusterung

				Frequenzspektrum
J. Bohse [26]	2003	Schädigungsmechanismen an GFK	Lokalisierung und Frequenzanalyse	Matrixversagen: 100-350 kHz Faserversagen: 350-700 kHz
C. Rowland [23]	2004	Schädigungsverhalten von Formel 1 CFK-Chassis	Analyse mittels Felicity Ratio	Grobe Abschätzung des Auftretens der Schädigungsmechanismen
W. Hufenbach [31]	2007	Schädigungsphasen bei Belastung von CFK-Material	Energiesprung-Amplituden-analyse, Schallereignisaktivität	Akustische Kenngrößen von Schädigungsphasen
M. Eaton [29]	2007	Einfluss von Geometrie und Sensorabstand auf Frequenzverhalten	Frequenzanalyse, FFT	Bestätigung Matrixversagen im niederfrequenten Bereich (<150 kHz) und Faserversagen im hochfrequenten Bereich (>300 kHz)
M. Sause [37] [12]	2008 - 2010	Identifikation von Schädigungsmechanismen	Mustererkennung/Clusterung, Frequenzanalyse	Clusterung auf Basis der WPF, mit Überlagerung im Matrix-Interfacespektrum
M. Eaton [33]	2011	Entwicklung eines Abgrenzungskriteriums	Modalanalyse der Wellenmoden, Amplitudenanalyse	MAR ermöglicht grobe Unterscheidung zwischen Matrix- und Interfaceversagen, Störgeräuschanfälligkeit
M. Sause [34]	2011	Einfluss der Signallaufzeit auf AE-Quellmechanismen	Clusterung, Frequenzanalyse	Starker Einfluss der Sensorankopplung auf Überlagerung bei Clusterung
S. Richler [34]	2013	Schädigungsmechanismen auf mikroskopischer Ebene	Amplituden- und Frequenzanalyse	Differenzierung Matrix-, Faserversagen, Faser-Matrix-Debonding mittels Choi-Williams-Darstellung
M. Radlmeier [36]	seit 2012	Identifikation der Schädigungsmechanismen in CFK	AE-Parameter, Frequenzanalyse, Wellenmodenanalyse	

Tabelle 3.3-1 Übersicht bisher durchgeführte Untersuchungen mit AE

Betrachtet man die Ergebnisse der Arbeiten auf diesem Gebiet kann zusammengefasst werden, dass in den letzten Jahren große Fortschritte bei der Detektion und Zuordnung der Schädigungsmechanismen an FVKs durch die Schallemissionsanalyse erzielt wurden. Eine eindeutige Zuordnung von Schallemissionsparametern zu Schädigungsmechanismen ist bis heute noch nicht erfolgt. Somit kann der für die Praxis relevante Übertrag auf ein Bauteil unter Betriebslast erst dann erfolgen, wenn eine eindeutige Zuordnung von AE-Parametern zu den

jeweiligen Schädigungsmechanismen möglich ist. Für die Grundlagenuntersuchungen wurden daher Versuche an Couponproben durchgeführt. Darüber hinaus wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf verschiedene Laminate mit unterschiedlichen Lagenaufbauten und Materialkombinationen untersucht.

3.3.3 Schallemissionsprozesskette

Die Schallemissionsprozesskette schließt alle relevanten Komponenten ein, die erforderlich sind, ein analoges Schallemissionssignal (SE-Signal) aufzuzeichnen. Des Weiteren beinhaltet sie auch alle notwendigen Arbeitsschritte für die Weiterverarbeitung der aufgezeichneten Signale. Zur Hardware zählen die Sensoren, welche die elastische Welle in ein elektrisches Signal transformieren, sowie die Vorverstärker und Nachverstärker, welche für die Signalfilterung und –verstärkung verantwortlich sind. Nach Aufzeichnung, Verstärkung und Filterung des Signals ist eine Interpretation oder Weiterverarbeitung der Schallemissionsdaten möglich. In Abbildung 3.3-8 ist der Ablauf der Schallemissionsmesskette mit den maßgeblichen Bestandteilen dargestellt.

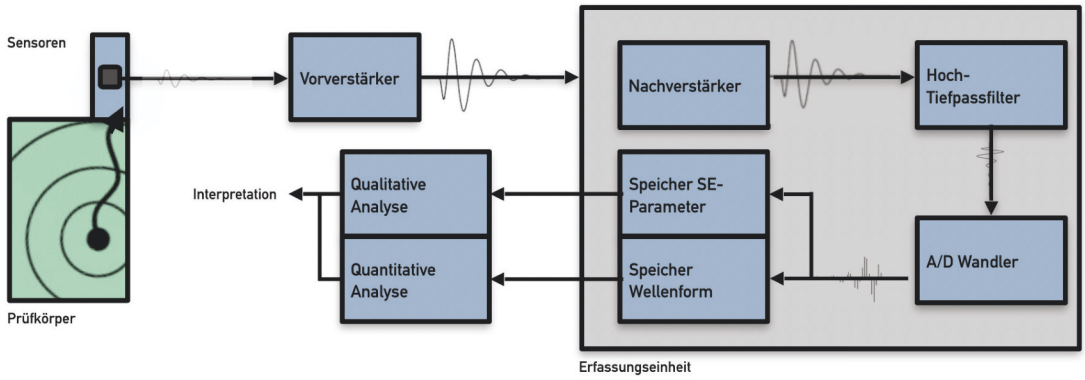


Abbildung 3.3-8 Prinzipielles Vorgehen bei der Messung und Analyse von Schallemissionssignalen nach [38]

Schritt eins ist die Wandlung der elastischen Wellen durch den Sensor in ein elektrisches Signal. Im zweiten Schritt wird das analoge elektrische Signal durch den Vorverstärker im Nutzsignalbereich verstärkt. In Schritt drei wird das Signal in den Nachverstärkern erneut verstärkt, um danach durch geeignete Filter (Hoch-, Tiefpassfilter) das Grundrauschen und die Störgeräusche auszufiltern. Bei der Verwendung von mehreren „Messketten“ spricht man von Messkanälen, in denen jeweils für sich die unterschiedlichen Verstärkungsschritte und Filterprozesse durchlaufen werden. Als vierter und letzter Schritt vor der Speicherung des Signals wird aus dem analogen Signal ein digitales Signal erzeugt. In Schritt fünf werden dann die digitalen Signale als sogenanntes Burst-Signal (Signal einer transienten Welle) gespeichert. Das Burst-Signal zeichnet sich durch einen eindeutigen Anfang und Ende aus, welches deutlich vom Grundrauschen zu unterschieden ist. Für die Aufnahme eines solchen Burst-Signals muss eine im Vorfeld bestimmte Spannungsschwelle in dB_{AE} betragsmäßig überschritten werden und wird als Hit bezeichnet [19]. Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten und Schritte näher erläutert.

3.3.3.1 Sensoren

Besonders geeignet für die Erfassung einer elastischen Welle, beispielsweise von einem Schallemissionsereignis, sind piezoelektrische Sensoren [39]. Die piezoelektrischen Sensoren

fungieren als Beschleunigungsaufnehmer, die einen annähernd gleichbleibenden Frequenzverlauf bis hin zu ihrer Resonanzfrequenz aufweisen. Dabei sind solche Piezo-Elemente für eintreffende Signale in erster Linie in eine Raumrichtung je nach Polarisierung besonders empfindlich [40]. Charakteristisch für ein piezoelektrisches Element ist die Piezoelektrizität. Somit geben piezoelektrische Elemente ein elektrisches Signal ab, das proportional zur aktuellen Belastung ist. Es gibt sowohl natürlich vorkommende Materialien (z.B. Quartz (SiO_2), Signettesalz ($KNaC_4H_4O_6$)) die einen piezoelektrischen Effekt aufweisen, als auch künstlich hergestellte Materialien (z.B. Blei-Zirkonat-Titanate). Beide eignen sich als piezoelektrisches Element für die Herstellung von Sensoren, die bei der Schallemissionsmessung eingesetzt werden [41]. Verantwortlich für das charakteristische Verhalten dieser Materialien ist die typische Anordnung der Kristalle (Gitterstruktur) im Inneren. An den jeweiligen Gitterpunkten der Kristalle sind die Atome entweder positiv oder negativ geladen. Ohne eine äußere Krafteinwirkung sind diese Ladungen im Kristall im Gleichgewicht (Abbildung 3.3-9). Wirkt jedoch eine äußere Kraft (z.B. Zug- Druckkraft) auf das Material ein, wird dieses Gleichgewicht aufgehoben und es kommt zu einer Anhäufung von elektrischen Ladungen an den Oberflächen, was das piezoelektrische Phänomen beschreibt.

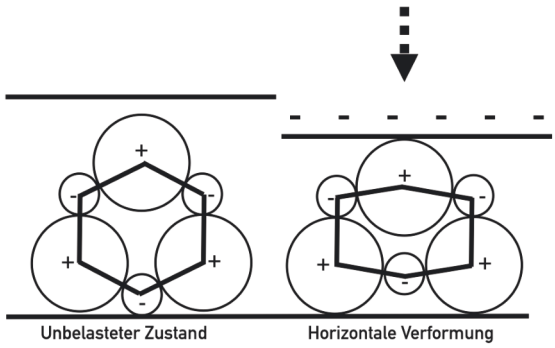


Abbildung 3.3-9 Wirkungsprinzip eines piezoelektrischen Materials durch Krafteinwirkung, unbelasteter Zustand (links), horizontale Verformung (rechts) nach [39]

Gemäß Janschek ergibt sich folgende Darstellung für geringe Verzerrungen im einachsigen Spannungszustand [42]:

$$\mathrm{D} = \varepsilon_0 \cdot \mathrm{E} + \mathrm{e} \cdot \varepsilon$$

Formel 3.3-4 Einachsiger, piezoelektrischer Spannungszustand

D steht für die dielektrische Verschiebungsflussdichte, E für die elektrische Feldstärke, ε für die Deformation des Körpers, ε_0 für die Permittivität des Vakuums (Naturkonstante, welche die Ausbreitung von Wellen im Vakuum beschreibt) und *e* für die piezoelektrische Kraftkonstante. Die Ladungstrennung und Polarisation eines Festkörpers beim Anlegen eines externen elektrischen Feldes *E* wird durch den ersten Term auf der rechten Seite der Gleichung beschrieben. Die Permittivität ε_0 sorgt für einen Verschiebungsfluss *D*. Ein derartiger Verschiebungsfluss kann bei manchen Materialien durch eine elastische Verformung *E* hervorgerufen werden. Die hiermit zusammenhängende Proportionalitätskonstante wird als *e* bezeichnet (piezoelektrische Kraftkonstante). Die Werte dieser Konstanten liegen gewöhnlich

zwischen 100 bis 1000 pm/V. Der inverse piezoelektrische Effekt ist das Gegenteil dieses Effektes und stellt die Spannung, welche sich durch ein externes elektrisches Feld ergibt, dar.

Die Materialgleichung setzt sich wie folgt zusammen:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon - e \cdot E$$

Formel 3.3-5 Materialgleichung piezoelektrischer Effekt

Auf der rechten Seite der Gleichung stellt der linke Teil das linear elastische Verhalten dar. σ steht für die elastische Spannung und E für die Deformation. Eine Abhängigkeit der beiden Größen entsteht durch den Elastizitätstensor C. Zu beachten ist jedoch, dass bei piezoelektrischen Materialien durch das Anlegen eines elektrischen Feldes E auch elastische Spannungen entstehen können. Dies beschreibt der zweite Term auf der rechten Seite der Gleichung [39], [42]. Die Richtungsgleichheit der mechanischen Spannung und Dehnung gibt in diesem Fall das negative Vorzeichen an.

Die Sensoren bei der Schallemissionsmessung müssen direkt auf der Oberfläche des Prüflings (in dieser Arbeit Probekörper oder Bauteile) angebracht werden. Dabei entsteht eine räumlich ausgedehnte, flächige Ankopplungsfläche (abhängig von der Geometrie) des Sensors oder Aktors. Dadurch ist das aufgezeichnete Signal das Integral der an der Ankopplungsfläche ankommenden Verschiebung. Für diese Art der Messtechnik ist eine kontaktfreie Applikation der Sensoren nicht möglich, sodass potentielle Übertragungsverluste zwischen der Grenzfläche des Prüflings und den Sensoren oder Aktoren möglichst niedrig gehalten werden müssen. Hierfür verwendet man ein sogenanntes Koppelmittel aus Silikonfett oder Öl, um die sensible Oberfläche des Piezoelementes zu schützen. Der aufgetragene Film des Koppelmittels sollte dabei so dünn als möglich sein und keine Verunreinigungen oder Lufteinschlüsse beinhalten, da ansonsten die Dämpfungswirkung des Koppelmittels zu groß wird. Um die Qualität der Ankopplung des Piezoelementes zum Prüfling abzusichern wird der HSU-Nielsen-Test durchgeführt. Hierbei wird ein Schallereignis durch den Bruch einer Bleistiftmiene auf dem Prüfling (Druckbleistift 2H, 0,3mm) unter einem vorgegebenen Winkel, um die Reproduzierbarkeit zu verbessern, erzeugt [19]. Um die Varianz der durch den HSU-Nielsen-Test erzeugten Schallsignale zu minimieren, werden die Bleistiftminenbrüche an jedem Sensor und am selben Ort (Abschwächung der Varianz in der Amplitude) mehrfach wiederholt. Eine weitere Möglichkeit, die Ankopplungsgüte zu überprüfen und sicherzustellen, ist die aktive Verwendung des Piezoelementes. Dazu wird der bereits beschriebene, inverse piezoelektrische Effekt verwendet, bei dem ein elektrisches Signal (elektrische Spannungsfunktion) an das dann Aktor genannte Piezoelement geleitet wird. Dieses elektrische Signal wird in eine mechanische Auslenkung umgewandelt und es breiten sich in der Struktur als Schallwellen aus. Diese können wiederum von den umliegenden Piezoelementen, die als reine Sensoren (Empfänger) fungieren, erfasst werden [38]. Die Position, an der entweder durch den Aktor oder durch den Bleistiftminenbruch das Schallemissionssignal hervorgerufen wird, ist bekannt. Dadurch ist es möglich, die materialabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit c durch die Differenz der Position von Sender und Empfänger Δl und der daraus resultierenden Laufzeitdifferenz Δt zwischen den Empfangssensoren zu berechnen (siehe nachfolgende Gleichung). Die Laufzeitunterschiede eines Schallemissionssignals und die dadurch berechnete Geschwindigkeit c ist auch die Grundlage für die Ortung des Schallemissionsereignisses. Auf die Lokalisierung wird im nächsten Abschnitt des Kapitels noch näher eingegangen.

$$c = \Delta l / \Delta t$$

Formel 3.3-6 Materialabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit

3.3.3.2 Triggerung der Signale

Die Schallemissionssignale werden nicht kontinuierlich aufgezeichnet. Deshalb wird das sogenannte Triggerkriterium über einen amplitudenabhängigen Triggerwert definiert. Dies kann sowohl ein fest definierter Wert der Amplitude (Schwellwert A_T), als auch durch die Flankenneigung definiert sein [38]. Im Allgemeinen gilt, dass bei der Überschreitung des dementsprechenden Grenzwertes die Aufzeichnung des Signals startet. Die Triggerschwellen können jedoch auch dynamisch bestimmt werden. Die Dynamik bezieht sich hierbei auf den gemittelten Wert des Rauschens. Übersteigt folglich ein ankommendes Signal diesen gemittelten Grenzwert, so wird die Aufzeichnung des Schallemissionssignals gestartet. Um eine hohe Ortungsgenauigkeit der Schallereignisse bei den Schallemissionsmessungen zu realisieren, werden mehrere Sensoren mit mehreren Messkanälen auf dem zu messenden Objekt appliziert. Also genügt es, wenn an einem dieser Kanäle der Grenzwert überschritten wird, um die Aufzeichnung an allen Kanälen zu starten. Über den Wert der Länge der jeweiligen Zeitreihe kann das Ende des Signals und somit auch das Ende der Aufzeichnung definiert werden. Dieser Wert kann individuell bestimmt und verändert werden [38].

3.3.3.3 Vorverstärker

Das Ausgangssignal des Sensors liegt gewöhnlich im Bereich um 10^{-12} V. Da dieser Bereich in einem ähnlichen Skalenbereich wie das Hintergrundrauschen liegt ist eine Vorverstärkung zur Separierung der Signale notwendig. Das Empfangsgerät ist lediglich meist in der Lage, Signale im Bereich von 0,01mV und 100V zu verarbeiten, was ebenfalls zu einer zwingenden Verstärkung der Signale führt [38]. Signale sind in diesen niedrigen Bereichen sehr anfällig für elektrische Störungen (z.B. Induktion, EMV, Streufelder) und die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Störungen steigt mit zunehmendem Abstand zwischen Sensor und Vorverstärker [43]. Die Verbindungskabel sollten dementsprechend so kurz als möglich gewählt werden und eine Abschirmung ist ebenfalls zwingend erforderlich. Eine Lösung dieser Problematik ist die Integration des Vorverstärkers in das Gehäuse des Sensors oder Aktors. Jedoch sind dann nicht mehr alle Anforderungen hinsichtlich Bauraumgröße der Sensoren oder Aktoren erfüllbar. Die Größenordnung der Verstärkung einer Spannung wird in Gain (G) angegeben und charakterisiert den Zusammenhang zwischen Eingangsspannung U_E und Ausgangsspannung U_A und wird in Dezibel (dB) angegeben [38]. Daraus resultiert nachfolgende logarithmische Umrechnung.

$$U[dB] = 20 \cdot \log(U[mV]) + 60dB$$

Formel 3.3-7 Signalverstärkung

$$G = U_A[dB] - U_B[dB] = 20 \cdot \log\left(\frac{UA[mV]}{UB[mV]}\right)$$

Formel 3.3-8 Verstärkung einer Spannung in Gain (G)

Die Vorverstärker weisen ein frequenzabhängiges Verhalten auf. Es ist wichtig, dass diese Abhängigkeit über einen möglichst breiten Bereich konstant ist, da sonst Signalverzerrungen die Linearität der Verstärkung negativ beeinflussen. Die Bandbreite des Verstärkers ist die

Differenz zwischen der oberen und unteren Grenzfrequenz. Dabei handelt es sich bei der unteren und oberen Grenzfrequenz um jene Frequenzen, bei denen die Verstärkung um 6 dB im Vergleich zu ihrem Maximum abgeklungen ist. Außerdem sind für Vorverstärker die Impedanz (Wechselstromwiderstand; Verhältnis von elektrischer Spannung zu aufgenommener Stromstärke) und die Ausgangsspannung entscheidend [38].

3.3.3.4 Nachverstärker und Frequenzfilter

Das vorverstärkte Signal wird im nachfolgenden Arbeitsschritt im Nachverstärker erneut verstärkt. Dies dient zur besseren Abgrenzung des AE-Burstsignals gegenüber unerwünschten Signalanteilen wie beispielsweise EMV-Störungen. Durch eine Einschränkung des Frequenzbereiches mittels geeigneter Frequenzfilter, können die Störanteile der Frequenz weitestgehend eliminiert werden und das Signal-Rausch-Verhältnis wird deutlich verbessert. Hierfür kommen je nach Frequenzbereich Hoch-, Tief oder Bandpassfilter zum Einsatz. Es ist darauf zu achten, dass bei der späteren Digitalisierung der hohen Frequenzanteile des analogen Signals keine Fehlabtastung (Aliasing-Effekt) durch ungeeignetes Vorfiltern auftritt.

Das rekonstruierte Signal setzt sich aus diskreten Zahlenwerten, die bei der Abtastung ermittelt werden, zusammen. Diese Abtastung findet durch die Abtast- oder Samplingfrequenz $f_S=1/\Delta t$ in festgelegten Zeitschritten Δt statt. Die Abtast- oder Samplingfrequenz ist so festzulegen, dass keine Frequenzanteile oberhalb der Nyquistfrequenz $f_{Ny} = 1/2\Delta t$ beinhaltet sind. Eine Tiefpassfilterung vor der Diskretisierung ermöglicht dies. Falls dennoch Signale Frequenzanteile oberhalb der Nyquistfrequenz besitzen, führt dies zum Aliasing-Effekt und zu hohe Frequenzen $f_{Ny} + \Delta f$ werden auf kleinere Frequenzen transformiert $f_{Ny} - \Delta f$. Das Ergebnis ist somit ein fehlerhaft rekonstruiertes Eingangssignal.

3.3.3.5 Digitalisierung durch Analog-Digital-Wandler

Bei der Diskretisierung der analogen Signale wird durch einen Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler oder ADC) die Signalamplitude in ein digitales Signal umgewandelt. Ein A/D-Wandler wird hauptsächlich durch seine Auflösung charakterisiert. Im Detail bedeutet dies die Anzahl der diskretisierten Werte in einer bestimmten Zeitspanne. Eine gezielt definierte Vorverstärkung sorgt dafür, dass die Signale in den jeweiligen Frequenzbereichen so angepasst werden, um bestmöglich abgebildet zu werden. Es ist darauf zu achten, dass die schwächsten Signale noch gut aufgelöst werden können und die stärksten ungefähr gleich zum maximalen Amplitudenwert sind. Bei den Schallemissionsmessungen kommen Signale mit unterschiedlichsten Maximalamplituden vor. Das ist der Grund, weswegen die Messtechnik eine gewisse Messdynamik aufweisen muss. Der A/D-Wandler muss folglich im Stande sein, die gemessenen Signale in Relation zur jeweiligen Amplitude unterschiedlich zu verstärken. Diese Dynamik wird durch das Gain-ranging (vordefinierter Bereich, in dem verstärkt wird) erreicht, bei der zusätzlich zur Maximalamplitude ebenfalls der dazugehörende Verstärkungsfaktor in parametrisierter Form abgespeichert wird [38].

3.3.3.6 Lokalisierungsverfahren

Um beispielsweise den Schadensverlauf inklusive Schadensfortschritt in einem Bauteil analysieren zu können, ist es zwingend notwendig, den genauen Ort der Schallemissionen zu kennen. Dabei ist die Lokalisierung des gemessenen, erfassten Schallemissionssignals auf Proben oder Bauteilebene der Lokalisierung von Erdbebenquellen nach Ludwig Geiger nachempfunden. Geiger stellte fest, dass ausschließlich die P-Welleneinsätze

(Primärwelleneinsatz) im Seismogramm aus mehreren Messstationen für die Bestimmung des Ursprungs verwendet werden können. Es gelang ihm, aus der ursprünglich zweidimensionalen Ortung des Ursprungs die dreidimensionale Ortung abzuleiten und die Tiefe des Erdbebenursprungs zu bestimmen. Dieser Ansatz, der auf den unterschiedlichen Laufzeiten von Schallereignissen (erzeugte elastische Wellen) zu den unterschiedlich weit entfernten Messstellen basiert, lässt sich auf die Schallemissionsanalyse übertragen und es kann der Quellort berechnet werden.

Die Lokalisierung des Schädigungsereignisses wird durch den Zeitpunkt der Emission, hervorgerufen durch unterschiedliche Schädigungsmechanismen, und den kartesischen Koordinaten (x_0, y_0, z_0) bestimmt. Vereinfacht wird für diese Berechnungsmethode das Schädigungsereignis als punktuelle Quelle betrachtet. Als Ersteinsatzzeit einer Kompressionswelle wird die erste Ankunftszeit einer elastischen Welle an einer Messeinheit bezeichnet. Allerdings ist der Scherwelleneinsatz (Sekundärwelleneinsatz) kaum zu erfassen und wegen des meist kleinen Abstandes der Messeinheiten zur Quelle sind die Wellenarten nicht eineindeutig zu differenzieren. Deshalb wird der Scherwelleneinsatz partiell von der abklingenden P-Welle überlagert. Es ist unumgänglich die materialabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der elastischen Welle so exakt als möglich zu bestimmen, um eine präzise Ortung zu gewähren. Des Weiteren werden noch die Koordinaten der Messsysteme und die Ersteinsatzzeiten der Einzelsignale benötigt. Die genauste Bestimmung der Ersteinsatzzeiten erfolgt nach wie vor durch händisches „Picken“, was für große Datenmengen zu einer langen Auswertezeit führt. Um den zeittreibenden Aufwand des händischen „Pickens“ zu beseitigen, wurden automatisierte Ersteinsatzpicker entwickelt, die eine ausreichende Präzision aufweisen. Der nachfolgende Abschnitt gibt einen tieferen Einblick in die automatisierten Ersteinsatzpicker.

3.3.3.7 Automatischer Ersteinsatzpicker

Sowohl für die Bestimmung des Quellortes in der Seismologie als auch bei der Schallemissionsmessung ist es notwendig, die Ersteinsatzzeiten der transienten Signale zu kennen. Für die Schallemissionsanalyse bedient man sich deshalb der Algorithmen, die für die Seismologie entworfen wurden. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass bei den Schallemissionssignalen das Hintergrundrauschen teilweise im selben Frequenzbereich liegt und partiell während einer Messung nicht im selben Bereich bleibt. Für diese neuen Anforderungen müssen die Algorithmen für die Bestimmung der Ersteinsatzzeiten angepasst werden. Um dieses Problem zu lösen, haben Kurz, Grosse und Reinhardt [44] einen automatisierten AIC-Picker (Bildung des Akaike Information Criterion (AIC), ein statischer Parameter für das transiente Signal, der die Grenze zweier Grundgesamtheiten aus der Signalstreuung bestimmt. Die Lage des Signalfensters, das für die AIC-Berechnung notwendig ist, wird mit einer Effektivwertschwelle bestimmt, die sich automatisch an das Signallevel des Messkanals anpasst, der im Gegenzug zu konventionellen automatisierten Pickern nur im ersten Teil des Signals Werte abgreift. Somit wird das Hintergrundrauschen bei den gepickten Daten nicht erfasst und die Ergebnisse sind von deutlich höherer Qualität. Man bedient sich dabei der Hilberttransformation (Teil der Fouriertransformation), um aus dem Eingangssignal deren Einhüllende zu berechnen. Die Hilberttransformierte $\bar{R}(t)$ einer Funktion R(t) ist wie folgt definiert.

$$\overline{R}(t) = R(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{R(t')}{t - t'} dt' = H\{R(t)\}$$

Formel 3.3-9 Hilberttransformierte

Das Integral muss im Bereich der Singularität t=t' als cauchyscher Hauptwert verstanden werden. Somit wird die Einhüllende verwendet, um den Anfang des Signals eindeutig zu bestimmen. Dies geschieht durch die Bestimmung eines Schwellenwertes, der bei Überschreitung des Signals auf 400 Samples vor und 150 Samples nach Auftreten des Schwellenwertes begrenzt. In den damit erzeugten Grenzen kann durch die AIC-Funktion der Startpunkt der Zeitreihe exakt berechnet werden [45].

$$AIC(t_\omega) = t_\omega \cdot \log\left(var\left(R_\omega(t_\omega, 1)\right)\right) + (T_\omega - t_\omega - 1) \cdot \log\left(var\left(R_\omega(1 + t_\omega, T_\omega)\right)\right)$$

Formel 3.3-10 AIC-Funktion

Der Index w steht für window und bezieht sich auf das verwendete Fenster, in dem der Startwert erwartet wird. T_w steht für den letzten Samplewert des gekürzten Signals, t_w umfasst den gesamten Zeitbereich in Rw und var bezeichnet die Standardabweichung. Dabei wird für den Term R_w (t_w , 1) die Varianz des aktuellen Wertes von t_w ermittelt, wohingegen beim Term R_w (1 + t_w , T_w) alle Werte von 1 + tw bis T_w für die Berechnung verwendet werden. Die Varianz (mittlere quadratische Standardabweichung) bildet sich gemäß folgender Berechnungsvorschrift:

$$var_{N-1}^2 = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(R_i - \tilde{R})^2$$

Formel 3.3-11 Varianz der AIC-Funktion

In dieser Gleichung steht N für die Länge des Signals, R_i ist der zugehörige Samplewert von R und der gemittelte Wert der Zeitreihe gibt $\hat{R}$ an. Das globale Minimum der AIC-Funktion definiert folglich den Ersteinsatzes des Signals. Die genaue Darstellung des Samplewertes eines Schallemissionssignals und die berechnete AIC-Funktion kann [45] entnommen werden.

3.3.3.8 Zweidimensionale Lokalisierung

Zweidimensionale Lokalisierungsverfahren werden auch ebene Lokalisierungsverfahren genannt, da sie lediglich eine Auskunft über die Koordinaten x und y der Schallemissionsquelle geben können. Diese Lokalisierungsverfahren eignen sich hervorragend für die Anwendung an Proben, bei denen die Materialdicke deutlich geringer ist als die ebene Ausdehnung. Folglich bilden sich in einem Material Lamb-Wellen aus, wenn die Dicke der Probe kleiner als die Wellenlänge der sich ausbreitenden Welle ist. Die Grundlagen der Ortung stammen aus der Seismologie und deshalb wird der Ursprung eines zweidimensional georteten Signals als Epizentrum bezeichnet. Es werden mindestens drei Sensoren für eine einwandfreie Lokalisierung im Zweidimensionalen benötigt. Wenn man davon ausgeht, dass sich die Welle in einem Material mit konstanter Geschwindigkeit ausbreitet, ist es möglich aus den verschiedenen Ankunftszeiten der Welle an den unterschiedlichen Sensoren das Epizentrum aus dem Schnittpunkt dreier Hyperbeln zu berechnen. Wie in Abbildung 3.3-10 zu erkennen

ist, liegen auf diesen Hyperbeln sämtliche Punkte, bei denen die Abstandsdifferenz der Ankunftszeiten zu den jeweilig involvierten Sensorkoordinaten gleichbleibend ist.

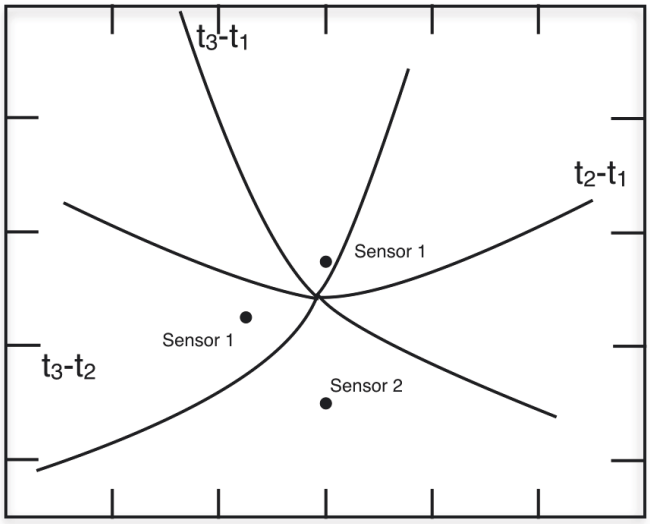


Abbildung 3.3-10 Zweidimensionale Lokalisierung durch Hyperbelschnitt; t1, t2 und t3 sind die Ersteinsatzzeiten an den jeweiligen Sensoren nach [40]

Für alle Sensorkombinationen wird eine Hyperbel berechnet. Der Schnittpunkt dieser Hyperbeln gibt somit den Ursprung der Schallquelle an. Eine Erhöhung der Sensoranzahl führt zu einer deutlich besseren Ortungsgenauigkeit und reduziert die Messanfälligkeit. Fällt beispielsweise einer der drei Sensoren aus oder empfängt das Signal nicht, stehen für die Ortung lediglich noch zwei Sensoren zur Verfügung, mit denen man nur eine Hyperbel berechnen kann. Somit wäre eine Ortung in der Ebene (planare Ortung) nicht mehr durchführbar. Dies ist auch der Grund, weswegen für die zweidimensionale Lokalisierung der Schallquelle inverse Verfahren, wie sie auch bei der dreidimensionalen Lokalisierung verwendet werden, zur Anwendung kommen [19], [40].

3.3.3.9 Dreidimensionale Lokalisierung

Für die dreidimensionale Lokalisierung, die technisch aufwendiger ist als die zweidimensionale, werden unterschiedliche Kenngrößen gebraucht, die so exakt als möglich bestimmt werden müssen. So müssen die Sensorpositionen (Sensorkoordinaten), die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium (materialabhängig) und die Ersteinsatzzeiten von mindestens vier Sensoren bekannt sein. Die Einsatzzeiten können entweder zuvor händisch gepickt oder über den zuvor beschriebene AIC-Picker ermittelt werden. Für die Lokalisierung wird anfangs ein Start-Hypozentrum (x_0, y_0, z_0, t_0) benötigt, das so nah als möglich am erwarteten Hypozentrum ist (in der Seismologie wird das Hypozentrum charakterisiert durch das Epizentrum und seine Tiefe unter der Erdoberfläche (Herdtiefe)). Somit ist das Hypozentrum der Punkt, von dem das Erdbeben ausgeht. Das Epizentrum ist hingegen dessen vertikale Projektion, welche auf der Erdoberfläche liegen sollte. Ein iterativer Algorithmus linearisiert dabei das Ortungsproblem. Die Laufzeit der Schallemission ergibt sich gemäß folgender Gleichung:

$$t_i = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{c} + t_0$$

Formel 3.3-12 Laufzeit Schallemission

Basierend auf den Koordinaten (x, y, z) wird die Laufzeit t zu den Sensorkoordinaten (x_i, y_i, z_i). berechnet. t_0 ist in der Gleichung die angenommene Ersteinsatzzeit und c steht für die Wellengeschwindigkeit im jeweiligen Material. Der zuerst angenommene Ort (räumlicher Startwert) des Hypozentrums führt zu kleinen Unterschieden zwischen den gemessenen und berechneten Ersteinsatzzeiten. Zur Minimierung dieser Differenz, dargestellt durch den Fehlwert r_i, werden sogenannte Korrekturterme (Δx, Δy, Δz) eingesetzt. Bei kleinen Korrekturen, wird die Laufzeitfunktion als linear angesehen und sie kann als Taylorreihe approximiert werden. Somit bleibt in der Gleichung lediglich der erste Term übrig und für das Residuum r ergibt sich:

$$r_i = \left(\frac{\delta t}{\delta x_i} \cdot \Delta x\right) + \left(\frac{\delta t}{\delta y_i} \cdot \Delta y\right) + \left(\frac{\delta t}{\delta z_i} \cdot \Delta z\right) + \Delta t$$

Formel 3.3-13 Fehlwert Ersteinsatzzeiten

oder in Matrixform $r = J \cdot A^{\vec{x}}$ mit J als Matrix der partiellen Ableitung und $\Delta\vec{x}$ als Korrekturvektor. Die partielle Ableitung jedes Elementes liefert die Einträge für die Matrix J und wird wie folgt berechnet:

$$\frac{\delta t_i}{\delta x} = \frac{(x - x_i)}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}$$

Formel 3.3-14 Partielle Ableitung der Elemente von Matrix J

Aus der Moore-Penrose-Inversen ergibt sich der Korrekturvektor:

$$\Delta x = (J^T J)^{-1} J^T r$$

Formel 3.3-15 Korrekturvektor

Bei einer höheren Anzahl an Sensoren (mindestens mehr als vier) wird das iterative Ergebnis des Korrekturvektors besser und somit auch die Lokalisierung exakter [40], [44].

3.3.4 Schallemissionsparameter

In der Vorschrift der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung DGZfP-SE3 werden alle relevanten Schallemissionsparameter die direkt für die Signalverarbeitung benötigt werden, beschrieben. Diese Parameter sind erläuternd in nachfolgender Abbildung 3.3-11 illustriert.

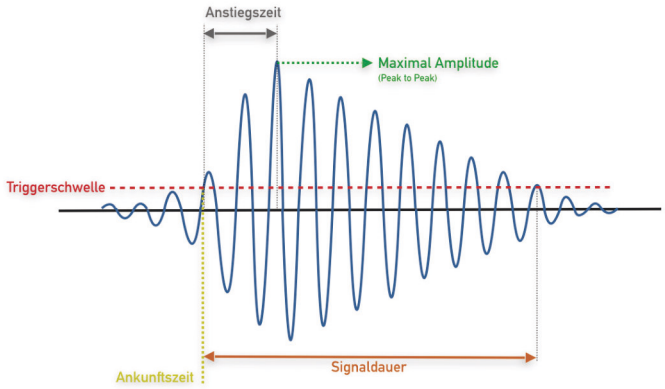


Abbildung 3.3-11 Darstellung der wesentlichen Schallemissionsparameter für ein Schallemissionssignal nach [43]

Sämtliche Schallemissionsparameter werden für jede einzelne Schallemission erfasst und gespeichert. Die Datenmenge der einzelnen Schallemissionssignale ist verhältnismäßig gering, sodass eine schnelle Datenerfassung und Weiterverarbeitung realisiert werden kann. Die aus Abbildung 3.3-11 bekannten Parameter können folglich noch während der Messung analysiert werden und auf ihre Plausibilität überprüft werden. Bei Messungen an großen Bauteilen mit einer großen Anzahl an Schallemissionswandlern, die während eines Belastungstests nahe an der Versagensgrenze des Bauteils eine sehr große Anzahl an Schallemissionssignalen verarbeiten müssen, entsteht eine große Menge an Schallemissionsparametern, die durch eine dementsprechend aufwändige Messtechnik verarbeitet werden müssen. Nachfolgend sind die Parameter gemäß Schechinger [46], Grosse [43] und Sause [12] definiert.

- Der Signalbeginn oder auch Ankunftszeit t_0 wird durch die erste Überschreitung eines vordefinierten Schwellenwertes charakterisiert. Die Schwelle ist gleichzeitig die Detektionsschwelle für jedes Burstsignal.
- Die Signaldauer N beschreibt den Zeitraum zwischen erstem und letztem Überschreiten der Detektionsschwelle. Das bedeutet, dass N vom vordefinierten Schwellwert A_T abhängig ist.
- Die Maximalamplitude U_{max} ist der betragsmäßig größte Amplitudenwert im gesamten Signal.
- Aus dem zeitlichen Abstand zwischen t_0 und U_{max} ergibt sich die Anstiegszeit t_A.
- Counts gibt die Anzahl der Überschreitungen des Schwellwertes U_T während der gesamten Signaldauer an.
- Der Energiegehalt E berechnet sich aus der quadrierten Amplitude U des Messsignals. Er setzt sich wie folgt zusammen:

$$E = \frac{1}{R} \cdot \int_{t=0}^{t*} [U(t)^2] dt,$$

Formel 3.3-16 Energiegehalt Schallemissionsparameter

R steht für den Widerstand des Vorverstärkers, U für Amplitude, die Zeit t und t* für die Messzeit.

- Felicity-Ratio (siehe Kapitel 3.3.2)
- Gewichtete Vorzugsfrequenz $f_{WPF} = \sqrt{\frac{f_{max} \cdot \int f \cdot \hat{U}(f) df}{\int \hat{U}(f) df}}$

Formel 3.3-17 Gewichtete Vorzugsfrequenz

Ohne die transiente Zeitreihe (definierter Anfang und Ende eines Signals) kann man jedoch nicht zweifelsfrei feststellen, ob die Signale mit den dazu gehörenden Parametern von einer Schallemissionsquelle sind oder von sich negativ auswirkende Ausbreitungseffekte stammen oder verändert wurden, und es kann daher keine fehlerfreie Interpretation der Schallemissionsparameter erfolgen. Darüber hinaus können Schallemissionsparameter abhängig vom gewählten Schwellenwert A_T sein [46].

3.3.5 Analysemöglichkeiten der Schallemissionsparameter

Trendverläufe von Schallemissionsparametern bieten weitere Betrachtungsmöglichkeiten [11]. Hier deuten spezifische Änderungen in Event- oder Energiesummen auf einen Schädigungsfortschritt oder das Erreichen eines instabilen Schädigungszustandes hin. Unterschiedliche Amplitudenverteilungen sind ein Hinweis auf die Anzahl der Schädigungsmechanismen und mit der Frequenzanalyse lassen sich Rückschlüsse auf die jeweiligen Schädigungsmechanismen treffen [26]. Grundlage hierfür ist die Annahme, dass eine höhere Verteilung der Amplitude in ihrer Intensität eine höhere Anzahl an unterschiedlichen Schädigungsmechanismen beinhaltet. Es wird angenommen, dass eine höhere Amplitude einen schwerwiegenderen Schaden darstellt. Allerdings muss dabei immer beachtet werden, dass die Intensität der Amplitude stark vom Abstand der Sensoren zur Schallquelle abhängt.

In den bisher erstellten Forschungsarbeiten wurden mehrere Betrachtungsweisen und Darstellungsvarianten verknüpft. Insbesondere bei der Ortung und Abgrenzung von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen in FVK ist es unumgänglich, mehrere Schallemissionsparameter vergleichend zu bewerten. An dieser Stelle werden außer den Schallemissionsparametern noch die Wellenform-und Wellenmoden analysiert und eine Frequenzanalyse durch die Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt. Des Weiteren ist eine Mustererkennung (z.B. mit neuronalen Netzwerken) und die Modellierung von Schallemissionsquellen denkbar. Grundlegend müssen Schallemissionssignale jedoch in zwei Kategorien unterteilt werden, ein dauerhaftes und ein transientes Signal. Das dauerhafte Signal ist dadurch gekennzeichnet, dass es trotz hoher zeitlicher Auflösung nicht getrennt werden kann. Ganz im Gegenteil zu den transienten Signalen, die sich durch einen eindeutigen Anfang und durch ein eindeutig definierbares Ende charakterisieren.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Zuordnung von Schallemissionsparametern zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen wie beispielsweise Delaminationen, Debonding, Zwischenfaserbrüche, Pull-Out und Faserrisse, die als diskontinuierliche Schädigungsereignisse definiert werden können. Deshalb liegt der Schwerpunkt auf der Analyse von transienten Signalen. Dies kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. So können die Energie-, Impuls- und Ereignisanalysen einzeln, distributiv (verteilend) und

kumulativ dargestellt werden. Mit der distributiven und der kumulativen Darstellungsvariante lassen sich Aussagen bezüglich der Schädigungsentwicklung treffen. Eine zeitliche Auflösung der detektierten Schallemissionssignale und später nach der Auswertung auch bezüglich den Events ist ebenfalls möglich. So ist eine der gängigsten Darstellungsvarianten der distributive oder kumulierte Vergleich von Hits zu Events über die Zeit. Hier entstehen die ersten Hits gemäß Literatur aufgrund schädigender Mechanismen im Werkstoff. Eine darauffolgende Veränderung (Anstieg) der Hits, Events oder Energieraten steht für einen Schädigungsfortschritt und ab einer gewissen Grenze wird entweder ein instabiler Zustand im Werkstoff erreicht oder es greifen neue Schädigungsmechanismen, wie zum Beispiel der Übergang von tendenziell energieärmerem Matrixversagen zu energiereicheren faserdominierten Schädigungsmechanismen. Wie die Literaturrecherche zu den bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten auf dem Gebiet der Schallemissionsanalyse ebenfalls schon zeigte, ist die Amplitudenanalyse hingegen nicht in der Lage, verifizierbare und reproduzierbare Aussagen bezüglich der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zu treffen, da die elastische Welle auf dem Weg durch den FVK auch im Vergleich zu isotropen Werkstoffen unterschiedlich stark abgeschwächt wird. Die erläuterten Schallemissionsparameter geben meist keinen Aufschluss über die Schädigungsmechanismen, wenn sie einzeln betrachtet werden. Eine vergleichende Gegenüberstellung und eine potentielle Verhältnisbildung hingegen kann über die Schädigungsmechanismen Aufschluss geben.

4 Verfahrensnachweis auf Couponebene

4.1 Vorbetrachtung

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Entwicklung des Versuchsaufbaus zur schallemissionsgerechten Charakterisierung von FVK-Proben. In das Versuchskonzept fließen die Erkenntnisse der Literaturrecherche und die Erfahrungen hinsichtlich der Materialcharakterisierung an Faserverbunden der Porsche AG ein, um die relevanten Schädigungsmechanismen in FVKs hervorzurufen und durch geeignete Schallemissionsparameter zu detektieren und nachzuweisen. Die diesem Kapitel zugrunde liegenden Messungen und Auswertungen wurden im Rahmen vom Autor betreuten Diplom- [20] und Masterarbeiten [45] erarbeitet und deren Ergebnisse in [47] und [48] publiziert. Dabei erfolgte die Zeitangabe der X-Achsen in ms am zeitlichen Beginn des jeweiligen Prüftages und wurde aufgrund der Sicherstellung der Vergleichbarkeit des Zeitstempels mit anderen Größen (z.B. Auslenkung, Kraft) der Versuchsdurchführung übernommen.

4.1.1 Testaufbau und Durchführung

Da die Schallemissionsanalyse eine passive Messmethode ist, müssen zur Identifikation der verschiedenen Schädigungsmechanismen, wie z.B. Delamination, Matrixriss oder Faserbruch, eben diese Schäden im Werkstoff künstlich erzeugt werden. Bei der Standardcharakterisierung von FVK bei der Porsche AG wurden unter anderem Zug (in Anlehnung an [49]) und 4-Punktbiegeprüfungen (in Anlehnung an [50]) durchgeführt. Diese Messungen wurden mit der Schallemissionsmesstechnik begleitet. Hierfür werden aus derselben Werkstoffkombination Proben mit einem Lagenaufbau von ±45°, QI und 0/90° entnommen. Die Bezeichnung der Proben ist eine porscheinterne, fortlaufende Nummer und lässt keine Rückschlüsse auf die Zusammensetzung des Faserverbundwerkstoffes zu. Dabei kann die Lagenanzahl von Werkstoffsystem zu Werkstoffsystem variieren.

Bei den Zugproben werden zusätzlich noch GFK-Aufleimer aufgeklebt, um die Probe vor dem Druck der Spannbacken zu schützen. Die Prüfung erfolgt auf einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick-Roell (AllroundLine Zwick100) mit hydraulischen Probenhaltern. Mit einem Messsystem des Fraunhofer IKTS aus Dresden (Typ MAS) wurden die benötigten Schallemissionsparameter berechnet, ausgewertet und analysiert. Das verwendete Messsystem setzte sich aus folgenden Komponenten zusammen: zwei vierkanal Multi-Channel Acoustic Measurement Systems (MAS), vier breitbandige Schallemissionsaufnehmer vom Typ KAR 601 S (Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 500 kHz), vier dazu gehörende Vorverstärker und einem CAN-Interface (USB-to-CAN-Anschuss). Das Messsystem stellte sich als zuverlässig und vollumfänglich geeignet für diese Art der Untersuchung heraus, sodass sämtliche Versuche mit diesem Messsystem durchgeführt wurden. Für fehlerfreie und reproduzierbare Schallemissionsmessungen an Proben an der Zwick 100 mussten zusätzliche Anforderungen erfüllt werden, die in der nachfolgenden Tabelle 4.1-1 und Tabelle 4.1-2 aufgelistet sind.

Sensoranbringung	
Spannbacken bzw. Auflager	Gewährleistung direkte und indirekte Kopplung zwischen AE-Quelle und AE-Aufnehmer
Arbeitsschutz	Splitterschutzfunktion muss gewährleistet sein
Materialprüfung	darf durch Sensorik nicht gestört sein
Sensorschutz	gegen Schädigung schützen
AE-Signal	Eliminierung der Störeinflüsse

Tabelle 4.1-1 Anforderungen Sensoranbringung

Sensorschutz	
Schutz vor Schädigung	Sicherung gegen Herunterfallen
Sensorposition	reproduzierbare Position
Sensorankopplung	Auftragung Koppelmittel, vergleichbarer Anpressdruck
Probenwechsel	einfacher Probenwechsel
Materialprüfung	klassische Kennwertermittlung läuft parallel, Messweg der MultiXtens (Extensometer) nicht beeinträchtigen
Herstellung	geringer Herstellungsaufwand

Tabelle 4.1-2 Anforderung Sensorschutz

Zur Eliminierung von elektrischen Störungen ist ein Kontakt der Sensoren mit metallischen Komponenten in der Prüfmaschine zu verhindern. Ausnahmen bilden die Spannbacken und Auflager, wenn indirekt die Schallsignale an den Probenhaltern abgenommen werden. Des Weiteren darf der Standardmaterialcharakterisierungsprozess nicht behindert werden. Hier war vor allem die Kollision der Sensoren mit der MultiXtense zur Dehnungsaufnahme der Probe zu lösen, da der Bauraum sehr begrenzt war. Nicht weniger wichtig ist die Schaffung möglichst idealer Messbedingungen für die Schallemissionsanalyse. Es war darauf zu achten, dass die Kopplung zwischen AE-Sensor und Probe reproduzierbar ist und die sich ausbreitende Welle ohne Störung vom Sensor erfasst werden kann. Bei den 4-Punkt-Biegeversuchen ließen sich die Anforderungen schnell erfüllen und die Sensoren wurden mit sogenannten Sensorjochs und Schrauben von beiden Seiten an den Auflagern befestigt. In Abbildung 4.1-1 sind die Sensorpaare mit den dazu gehörenden Jochs abgebildet.

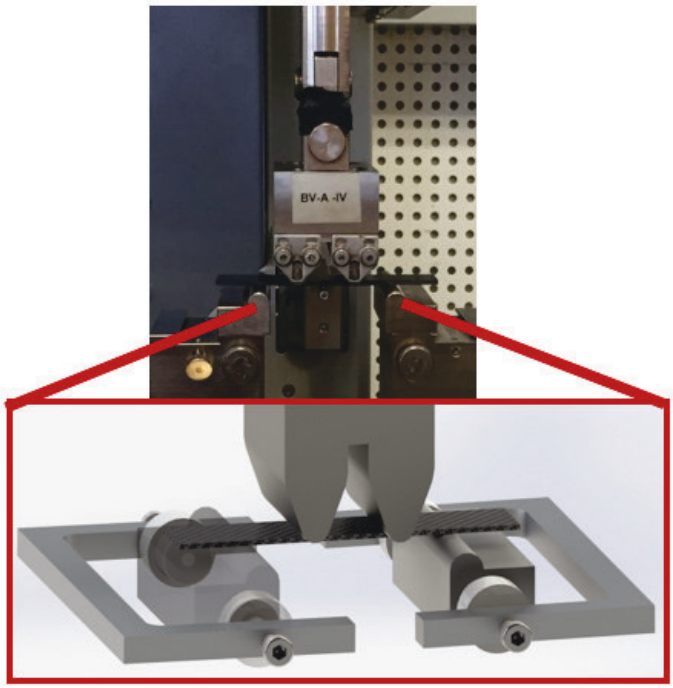


Abbildung 4.1-1 Sensoranordnung 4-Punkt-Biegeversuch

Durch die symmetrische Anordnung der Sensoren ist eine Lokalisierung der Quellorte möglich. Es würden für eine lineare Ortung der Quellorte lediglich zwei Sensoren genügen, sofern diese an den jeweiligen Probenenden appliziert werden würden. Jedoch wird durch das Verwenden von vier Sensoren eine reproduzierbar gute Ankopplung realisiert, bei der die Sensorpaarung mit den kleinsten Laufzeitdifferenzen der Ersteinsätze bei der Auswertung verwendet werden. Bei Zugversuchen gibt es prinzipiell zwei Ansätze, die Schallsignale von der Zugprobe abzugreifen. Die erste Möglichkeit ist, die Sensoren direkt auf dem Zugstab zu applizieren und die zweite Variante über eine Applikation der Sensoren, ähnlich wie bei den Biegeversuchen, auf den hydraulischen Spannbacken. Beide Varianten sind nicht so einfach wie die Sensoranbringung bei den 4-Punkt-Biegeversuchen umzusetzen. So wurde im ersten Schritt ein Sensorschutz konstruiert, der es ermöglichte, die Sensoren direkt auf der Zugprobe anzubringen, wie in folgender Abbildung 4.1-2 dargestellt ist.

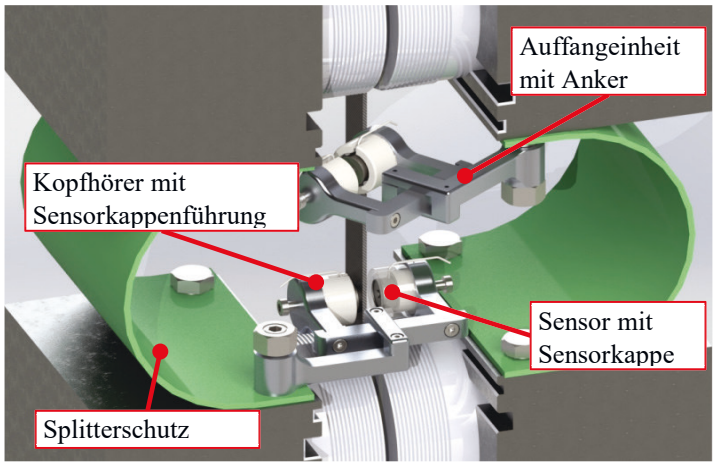


Abbildung 4.1-2 Sensorschutz für Zugversuche an Zwick100

Um die bei den Zugprüfungen üblichen Materialdehnungen ausgleichen zu können, ist eine Verschiebung in vertikaler Richtung möglich und der Splitterschutz (grün) ist in die Konstruktion integriert. Da die piezoelektrischen Sensoren sehr empfindlich sind, kann es bei dieser Art der Sensorapplikation zu Defekten an der Messtechnik kommen. Wenn eine Probe genau im Bereich der Sensoren schlagartig bei hohen Spannungen versagt, kann die Piezokeramik im Innern des Sensors beschädigt werden. Ein ganzheitlicher Schutz der Sensoren während der Messung ist somit nicht möglich. Allerdings ist durch die symmetrische Applikation der Sensoren eine Ortung der Schallquellen realisierbar. Als Weiterentwicklung der Schallemissionsmessung im Zuge der Materialcharakterisierung bei der PAG in Weissach, wurde dann zusätzlich die zweite Variante der Sensorapplikation direkt auf der Spannbacke umgesetzt. Die Benutzerfreundlichkeit wurde damit deutlich erhöht und die Dauer des Einspannvorgangs der Probe verkürzt. Zusätzlich waren die Ergebnisse hinsichtlich der Reproduzierbarkeit besser als bei der direkten Applikation der Sensoren auf der Probe. Dies kann daran liegen, dass die Sensoren auf den Spannbacken bei großer Dehnung der Probe nicht ins Rutschen geraten. Der Umstand der höheren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, die höhere Bedienfreundlichkeit und das Eliminieren des Risikos der Sensorbeschädigung führte zu der Entscheidung, die Zugversuche ausschließlich mit dieser Art der Sensorapplikation durchzuführen. Hierzu musste die Sensorposition mechanisch nachbearbeitet werden. Nachfolgend ist diese Art der Sensorapplikation in Abbildung 4.1-3 dargestellt.

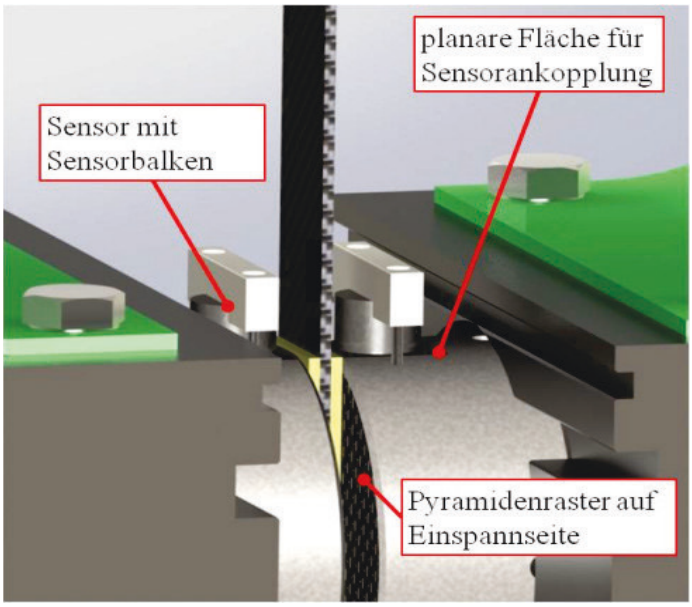


Abbildung 4.1-3 Sensoranbringung auf Spannbacken

Grundlegend werden bei der durch die Schallemissionsmessung begleiteten Materialprüfung zwischen zwei unterschiedlichen Varianten der Prüfung unterschieden. Die konventionelle Variante, bei der die Zugkraft kontinuierlich gesteigert wird bis die Probe versagt, und die zyklische Variante. Diese ist speziell wenn es um Vorschädigungsverhältnisse wie beispielsweise das Felicity Ratio geht unabdingbar und es müssen die Zug- und Biegeversuche in zyklischen Laststufen gefahren werden. Es werden also unterschiedliche Zyklen definiert, bei denen vorerst eine definierte Kraft angefahren wird. Diese wird eine ebenso definierte Zeit gehalten, bis sie anschließend auf eine zuvor eingestellte Vorkraft absenkt. Im darauffolgenden Zyklus wird eine nächst höhere Kraft angesteuert. Die Maschine ist lagegesteuert, da es bei einer kraftgesteuerten Versuchskonfiguration zum „Überschwingen“ der Prüfmaschine

kommen kann. Dabei ist die Höhe und Anzahl der Kraftniveauzyklen abhängig vom Material und Lagenaufbau der Proben und wird bei unbekannten Materialsystemen und Lagenaufbauten mit einer zum Einfahren verwendeten Referenzprobe ermittelt.

Die Schallemissionsmessung und die nachgeschaltete Auswertung der Messdaten und deren Analyse ist stark von Erfahrungswerten abhängig und steht in einem ebenso starken Zusammenhang zu den gewählten Versuchsbedingungen. Deshalb werden zunächst Vorversuche durchgeführt, um die Einflüsse auf das Schallemissionssignalverhalten verschiedener Faserverbunde zu untersuchen. Dabei wurden definierte Prüfparameter variiert. Die Vorversuche wurden zyklisch und konventionell durchgeführt. Einen großen Einfluss auf das Schallemissionssignalverhalten haben die Probengeometrie, der Lagenaufbau und die Materialauswahl. Somit wurden für die Vorversuche Materialkombinationen gewählt, die sich in ihrem Faser-Matrixmaterial, der Materialstärke und dem Lagenaufbau unterscheiden.

4.1.2 Versuchskonzept / Auswahl geeigneter Schallemissionsparameter

Um das Schädigungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen und deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften besser verstehen zu können, muss eine Methode erarbeitet werden, die es zulässt, die Schädigungsarten detailliert aufzulösen. Somit muss auf Basis der aus der Literaturrecherche gewonnenen Erkenntnisse ein Versuchskonzept abgeleitet werden, das es ermöglicht die gemessenen Schallemissionen zu Schallemissionsparameter zuzuordnen und im Nachgang den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zuzuweisen. Erfahrungen zeigten, dass eine Zuordnung von Schädigungsmechanismen mit lediglich einem Schallemissionsparameter zu unzuverlässig ist und erst der Abgleich mit anderen Schallemissionsparametern aussagekräftig ist. Während der Auswertung der Schallemissionen in der Nachbearbeitung der einzelnen Versuchsreihen werden somit verschiedene Schallemissionsparameter ausgewertet und für die Interpretation herangezogen.

Zur Überprüfung der linearen Ortbarkeit und Nutzbarkeit der absoluten Energie wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Dazu wurde auf einer Zugprobe, wie in Abbildung 4.1-4 dargestellt, in definierten Abständen (blau markiert und nummeriert) Bleistiftminenbrüche durchgeführt.

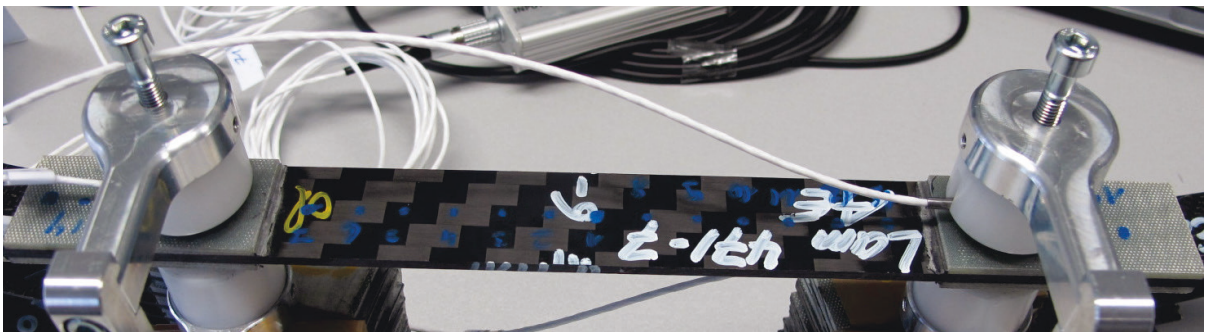


Abbildung 4.1-4 Probenpräparation für Lokalisierungs-Versuche

Beginnend bei Punkt eins wurde an jeder Markierung dreimal ein Schallsignal nach HSU-Nielsen erzeugt. In Abbildung 4.1-5 ist die Lokalisierung der erzeugten Schallsignale dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Lokalisierung eine sehr gute Ortungsgenauigkeit der Bleistiftminenbrüche aufweist.

Zwar ist der Bleistiftminenbruch von seiner Intensität und Signalcharakteristik nicht vergleichbar mit den aus Faserbrüchen, Debonding, Matrixrissen, etc. erzeugten Schallsignalen. Allerdings gibt er als reproduzierbare Referenzquelle mit fast immer gleicher Intensität Aufschluss über das Verhalten der absoluten Energie als Schallemissionsparameter. Dabei wurde festgestellt, dass die absolute Energie bei allen Triggerkanälen überwiegend gleich ist. Gegen Ende des Versuches fällt aufgrund des abnehmenden Abstandes zwischen dem Ort des Bleitstiftminenbruches und dem Triggersensor auf, dass die Energie zunimmt (Abbildung 4.1-5), weil sie nicht auf den Ursprungsabstand der Schallquelle zurückgerechnet wurde. Dies ist der Grund, weswegen mit der absoluten Energie keine Aussagen zu den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen getroffen werden können. In den weiterführenden Untersuchungen wurden die Schallemissionen mit der partiellen Leistung über der gewichteten Vorzugsfrequenz abgetragen um eine Aussage über verschiedene Schädigungsmechanismen zu erhalten (ab Kapitel 4.3).

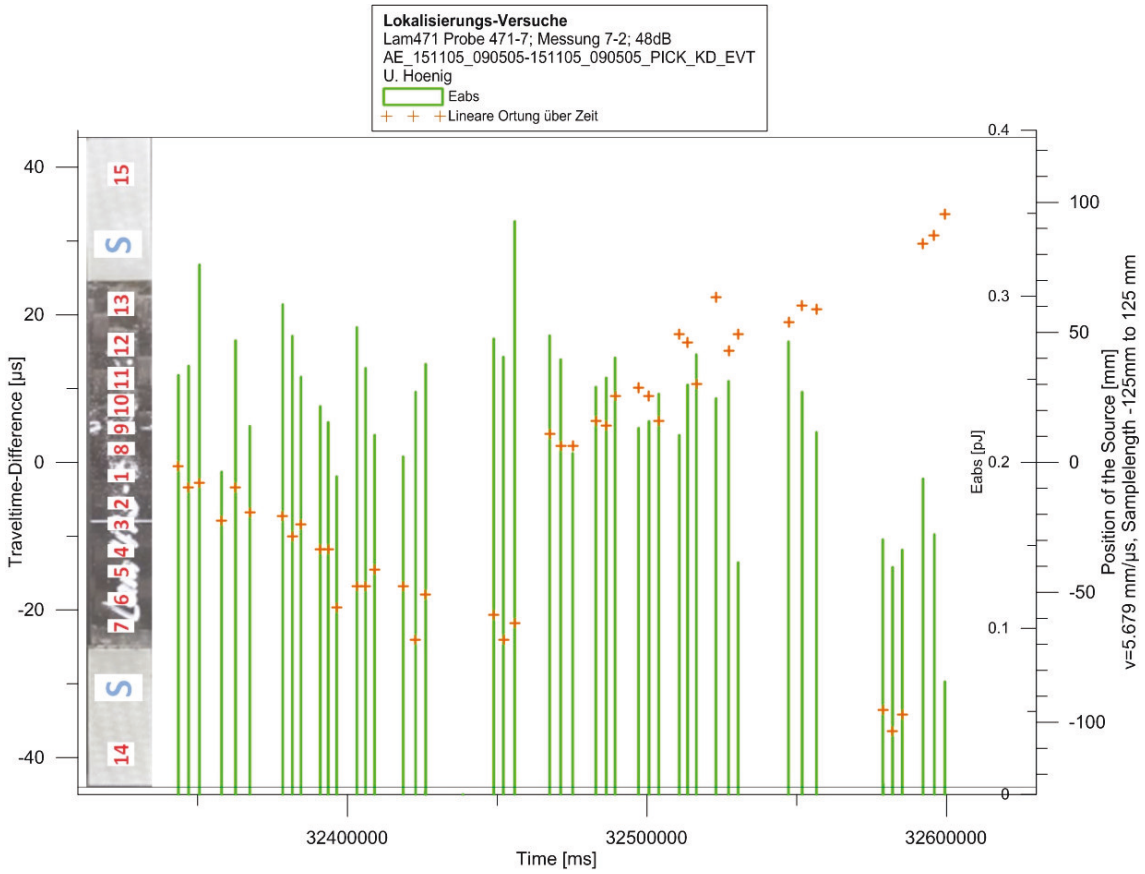


Abbildung 4.1-5 Lokalisierung der Bleistiftminenbrüche, konstante Eabs-Verteilung

Dabei wird jedes Schallsignal in den Frequenzbereich transformiert und die Centroidfrequenz (Flächenschwerpunkt des Integrals des transformierten Schallsignals, $f_{centroid}$) mit einbezogen. Dadurch werden einzelne Frequenzausreißer eliminiert und eine etwaige schlechte Ankopplung des Sensors korrigiert, da bei einer schlechten Ankopplung vor allem hochfrequente Bereiche des Signals fehlen, die auf ein matrixdominiertes Schädigungsereignis hinweisen. Die Berechnung der WPF erfolgt ebenfalls bei der nachgeschalteten Auswertung der Rohdaten. Zusätzlich wird zur Eliminierung von Störsignalen die Wellenform der transienten Signale der Events einzeln ausgewertet und analysiert. Darüber hinaus werden die kumulierten Hit- und Eventverläufe abgeglichen, da eine zu große Abweichung zwischen diesen zwei Parametern

auf potentielle Fehler in der Versuchsdurchführung schließen lässt. Ebenso ist die eindeutige Lokalisierung der Schallquelle eine Voraussetzung für die Identifikation der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen. Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik bietet noch keinen finalen Beweis für die Zuordnung der Schallemissionsparameter zu den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen über beispielsweise eine gewisse Frequenzverteilung in Kombination mit hohen Energieumsätzen einzelner Events, zu einem Faserbruch. Deshalb wird mit weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren der Ansatz verfolgt, eben diesen Nachweis auf Probenebene zu erbringen und diese Erkenntnisse auf die Schädigungshistorie von Bauteilen zu übertragen. Es werden mit Computertomographieaufnahmen Schadensbilder validiert, die zuvor durch lokalisierte Schallereignisse und Schallemissionsparameter zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zugeordnet wurden.

4.2 Zerstörende Vorversuche

Die Vorversuche dienen zur Validierung des Versuchskonzeptes und es sollen ebenfalls geeignete Materialkombinationen und geeignete Probengeometrien definiert werden. Anhand der Erkenntnisse der Vorversuche werden dann die nachfolgenden Versuchsreihen mit variierenden Materialparametern abgeleitet, um die unterschiedlichen Schädigungsmechanismen durch geeignete Lasteinleitung im Faserverbund einzubringen. Wichtig sind hierbei die deutliche Trennung der charakteristischen Schallemissionsparameter hinsichtlich der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen und deren zweifelsfreie Darstellung, genauso wie ein störungsarmer Betrieb der Messtechnik. Es wurde folglich das Signalverhalten und die damit zusammenhängende Detektion der Signale in Abhängigkeit vom Versuchsaufbau überprüft.

Dabei wurden die unterschiedlichen Ankopplungskonzepte sowie die Funktionsfähigkeit der Schnittstellen zum Messplatz an der Universalprüfmaschine Zwick 100 erprobt. Das Standardmaß der Biegeproben ist 100x25 und das der Zugproben 250x25 (Länge in mm x Breite in mm). Die Dicke ist abhängig vom verwendeten Halbzeug und der Anzahl der verwendeten Lagen im Laminat. Üblicherweise beträgt die Dicke bei Standardproben bei der PAG ca. 2 mm. Auf die Zugproben werden an beiden Enden zusätzlich „Aufleimer“ mit 55 mm Länge und 25 mm Breite aus GFK aufgeklebt, um das zu prüfende Material bei der Einspannung nicht zu beschädigen. Um die materialspezifische Schallgeschwindigkeit zu erfassen wurde bei allen zu prüfenden Materialien der HSU-Nielsen-Test durchgeführt. Hierzu wurde an beiden Sensorpaaren jeweils dreimal dieser Test durchgeführt. Sowohl die Zugversuche, als auch die 4-Punkt-Biegeversuche wurden konventionell und zyklisch geprüft.

Die ersten Erkenntnisse zur Funktionalität des Versuchsaufbaus und der Prüfbedingungen liefern die Laminatreihe mit den Nummern 840, 841 und 842 wie in Abbildung 4.2-1 dargestellt. Es sind die kumulierten Hits und Events, die absolut umgesetzte Energie, sowie die Maschinendaten / Betriebsdaten Auslenkung (Displacement) und die Kraft (Force) grafisch dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass es einen großen Unterschied zwischen den kumulierten Schallemissionsereignissen (Hits) und den von mindestens zwei Sensoren georteten Schallemissionen (Events) gibt. Da dies für so kleine, geometrisch einfach gestaltete Proben unüblich ist, weist eine starke Abweichung der zwei Schallemissionsparameter auf eine

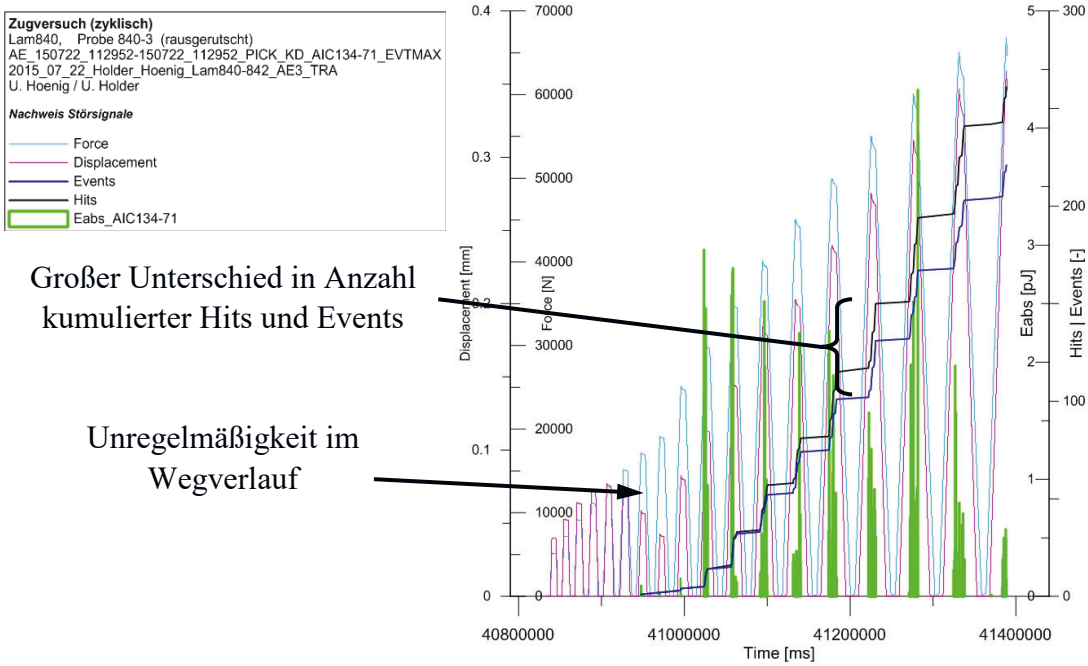


Abbildung 4.2-1 Zugversuch 840-3, Darstellung Betriebsdaten und AE-Parameter

Störung der Messung hin. Somit ist eine indirekte Überprüfung der Messtechnik möglich, was zu einer hohen Güte der Ergebnisse führt. Abbildung 4.2-2 zeigt die georteten Schallemissionsereignisse abgetragen über die Versuchszeit. Proben des Laminats 840 (0/90°) versagten bei dieser Versuchskonfiguration nicht. Vielmehr versagte die Klebung des Aufleimers und somit konnten die im Aufleimer-Bereich aufgetretenen Schallemissionen untersucht werden. Dies ist ein interessanter Nebeneffekt und die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich mit der Schallemissionsmessmethode ebenfalls geklebte Fügeverbindungen charakterisieren und überwachen lassen können. Auf diesem Feld versprechen weiterführende Arbeiten neue, hilfreiche Erkenntnisse.

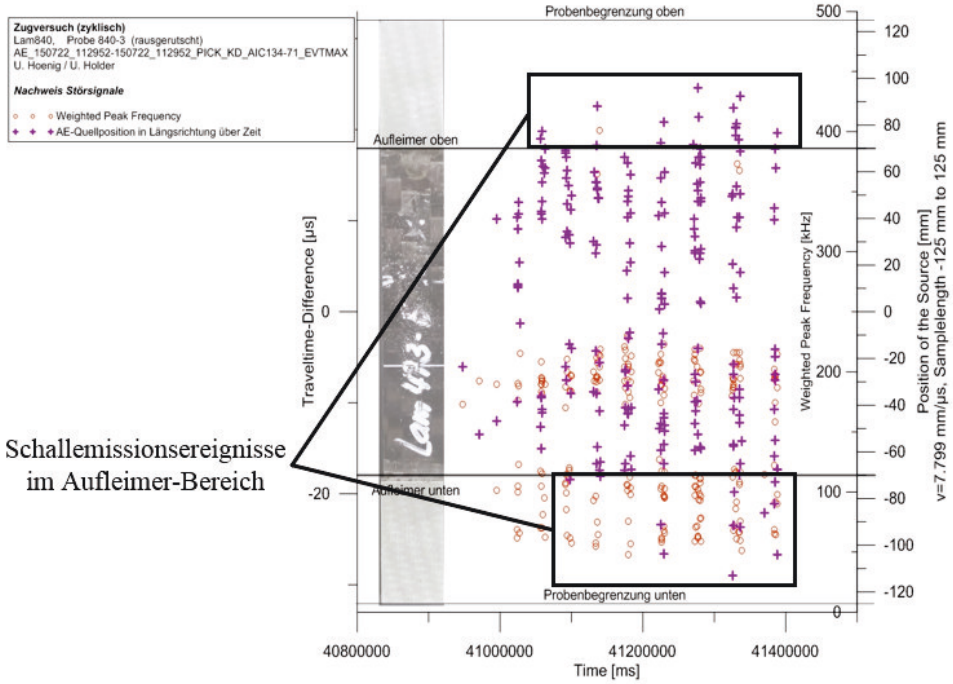


Abbildung 4.2-2 Zugversuch 840-3, Lokalisierung von Schallemissionsereignissen im Aufleimer-Bereich

Der Quellort des Schallereignisses ist durch lila Kreuze dargestellt. Es handelt sich hier um eine lineare Lokalisierung und somit werden die Schallereignisse längs zu der exemplarisch hinzugefügten Probe abgebildet. Die Weighted Peak Frequency (WPF) ist durch rote Kreise dargestellt. Die Schallereignisse ober- und unterhalb der freien Probenlänge (Bereich der nicht von den Spannbacken eingeschlossen ist, in diesem Fall der Bereich zwischen den Aufleimern) weisen auf das bereits erwähnte Versagen der Klebung im Aufleimer-Bereich hin oder sie sind ein Indiz für das Rutschen der Probe zwischen den Spannbacken. Jedoch spricht das sehr hohe Niveau der WPF gleich beim Versuchsstart für das Versagen der Klebung, da Frequenzen in dieser Höhe faserdominierten Schädigungsmechanismen zuzuordnen und diese bei niedrigen Lastniveaus noch nicht zu erwarten sind. Die Unregelmäßigkeit in der Wegaufnahme hat nichts mit der Schallemissionsmessung zu tun, sondern war auf einen defekten Wegaufnehmer zurück zu führen. Wie in Abbildung 4.2-3 dargestellt, wiesen die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche der Vorversuche ein gutes Verhältnis von Hits zu Events auf und somit kann der Versuchsaufbau unverändert bleiben.

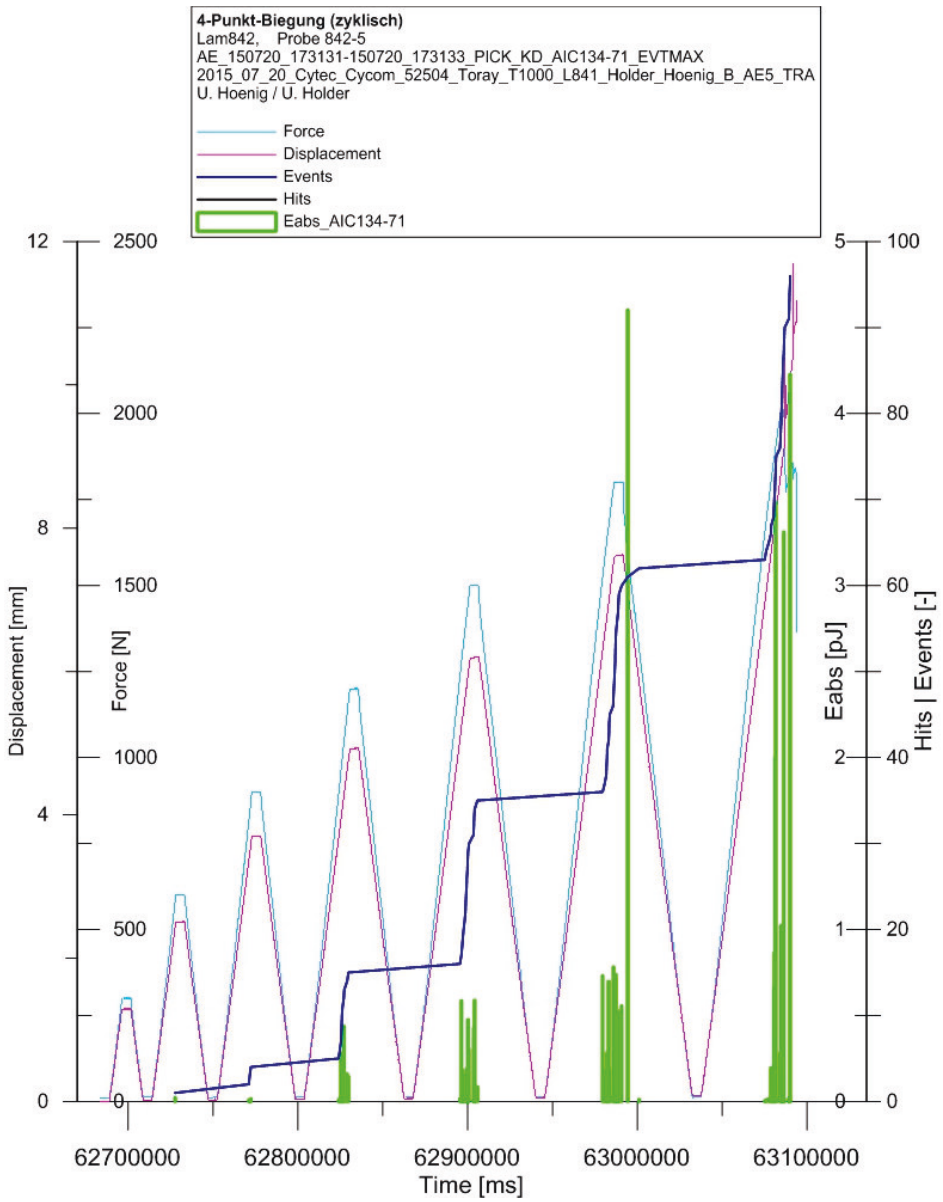


Abbildung 4.2-3 Übereinstimmung von Hits und Events für Biegeversuche

Biegeproben mit einem ±45° Lagenaufbau wiesen verhältnismäßig wenig Schallemissionsaktivität auf. Dies war nicht zu erwarten, da bei diesem Lagenaufbau und Belastungsregime matrixdominierte Schädigungsmechanismen vor allem am Anfang des Versuches zu erwarten waren. Vielmehr wurden die Proben bezüglich der Schallemission erst nach dem Kraftabfall der Prüfmaschine aktiv, wie in Abbildung 4.2-4 zu erkennen ist. In diesem Fall sind die Proben stark geschädigt und eine akustische Charakterisierung bezüglich des Vorschädigungsverhaltens war nicht möglich. Bei bestimmten Werkstoffkombinationen mit ±45° Lagenaufbau werden bei den Vierpunktbiegeversuchen eine sehr große Durchbiegung erreicht. Es besteht die Möglichkeit, dass sehr elastische Proben auch aufgrund ihres Lagenaufbaus kaum vorgeschädigt werden und deshalb die Schallemissionsaktivität so gering war.

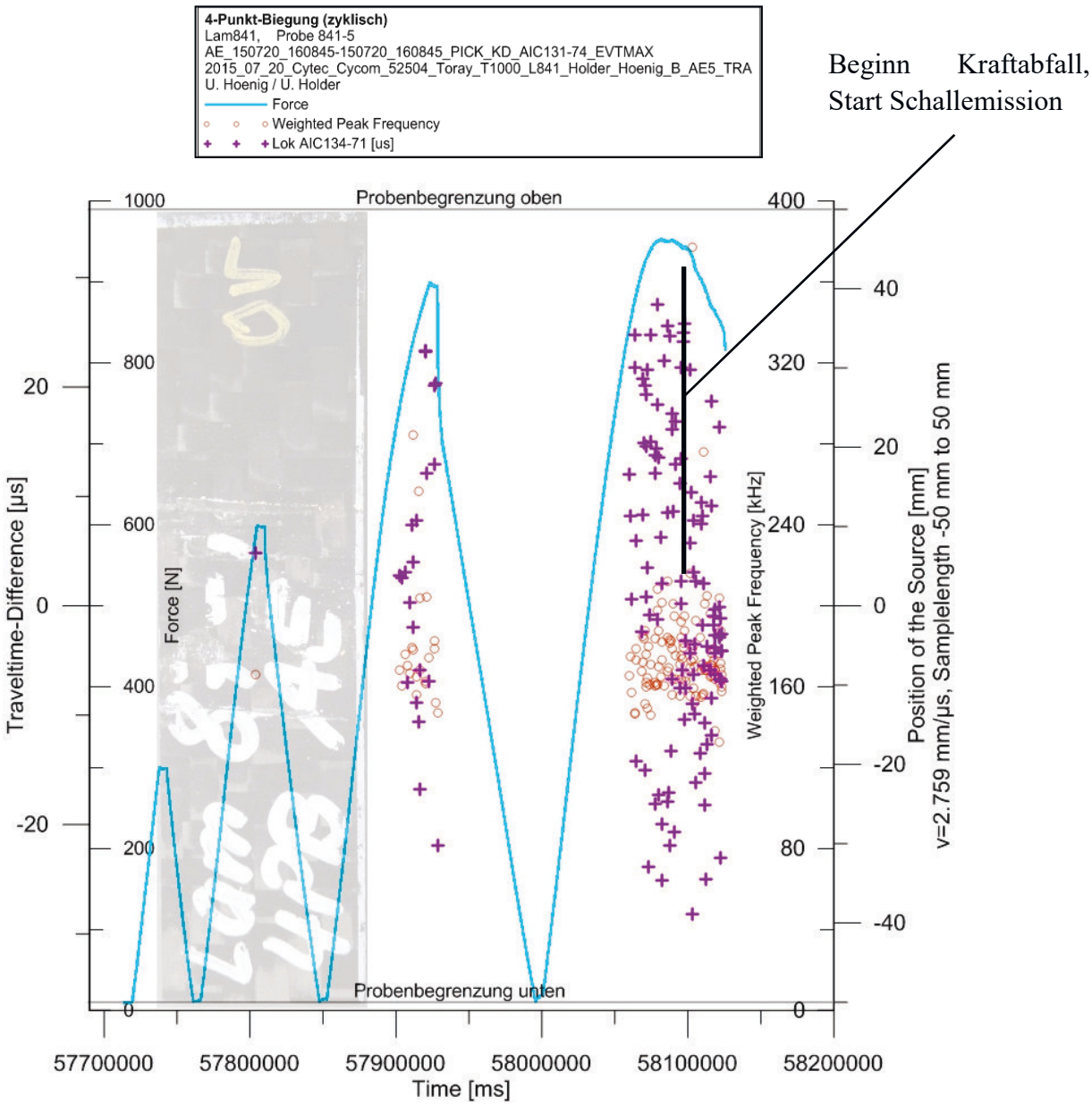


Abbildung 4.2-4 4-Punkt-Biegeversuch, Probe 841-5 [±45°], Events mehrheitlich nach Kraftabfall

In der Abbildung 4.2-5 sind die Ergebnisse der gesamten Laminatreihe 840 bis 842 für Zug und 4-Punkt-Biegung dargestellt. Die Ergebnisse wurden mit der Partial Power 1 über der WPF

aufgetragen. Mit dieser Art der Darstellung gelang es Sause verschiedene Cluster nachzuweisen, die er unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zuordnete [32]. Die Vorversuche zeigten für die gewählten Versuchskonfigurationen eine Clusterausbildung der Schallemissionssignale. Dies ist eine wichtige Erkenntnis, da die Clusterbildung in früheren Abhandlungen zu diesem Thema hauptsächlich bei Messungen an Proben festgestellt wurde, die einen deutlich weniger komplexen Aufbau hatten. In den Vorversuchen lassen sich deutliche Unterschiede in der Frequenzverteilung zwischen den Zug- und Biegeproben erkennen. Darüber hinaus ist beim zweiten Cluster der Zugversuche eine geringere partielle Energie zu erkennen. Diese Unterschiede konnten auf die zuerst gewählte Sensorapplikation direkt auf den Zugproben zurückgeführt werden, da beim Bersten der Proben unter hoher Last die Piezokeramik oder deren Kontaktierung im Inneren des Sensors beschädigt wurden. Des Weiteren verfälschten die Schallemissionsaktivitäten im Aufleimer-Bereich durch das Versagen der Klebung und durch das Rutschen der Proben im Aufspannbereich bei den 0/90° Proben (sehr hohe Zugfestigkeit) die Messergebnisse. Bei dieser Probe war die Belastungsgrenze der Universalprüfmaschine erreicht und für weitere Untersuchungen wurde die Materialauswahl angepasst.

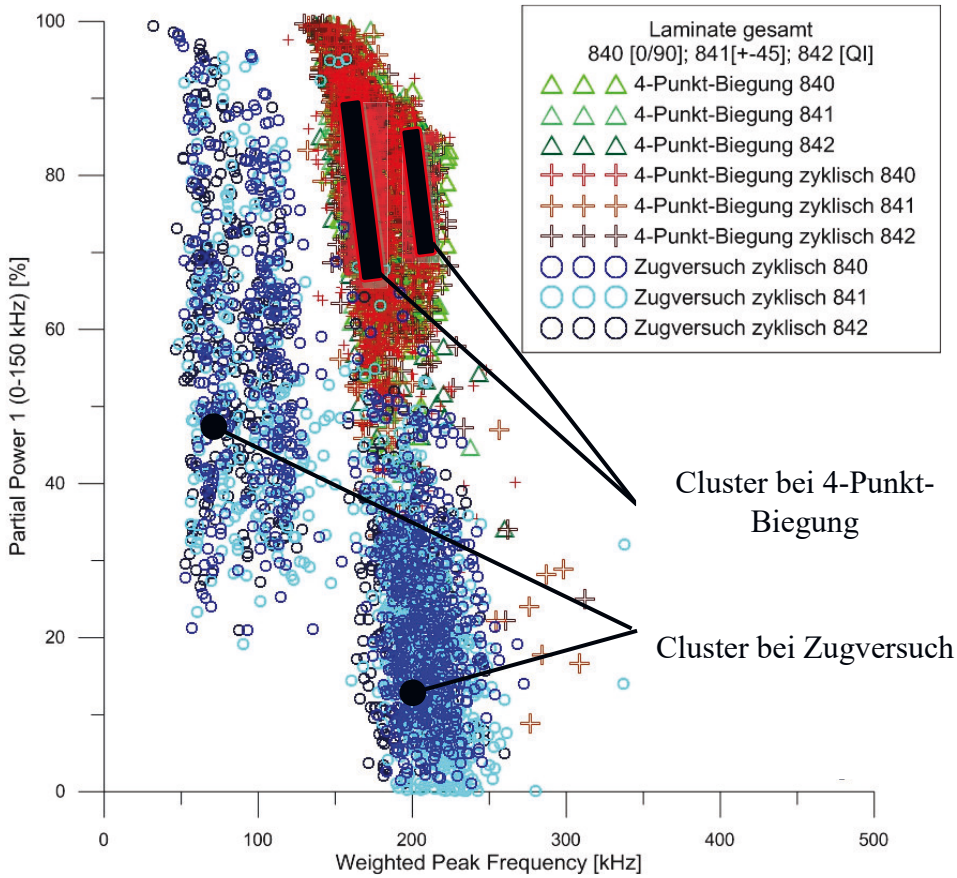


Abbildung 4.2-5 Zusammenfassung der Frequenzverteilung aller Proben der Laminate 840-842

Die Ergebnisse der Vorversuche wurden nicht in weiterführende, vergleichende Darstellungen der Schallemissionsparameter aufgenommen. Sie dienten lediglich zu Messmittelbefähigung und zur Definition des Versuchsregimes.

4.3 Ergebnisse zerstörende Vorversuche

4.3.1 Vergleich des Schallemissionsverhaltens konventioneller und zyklischer Versuchsdurchführung

Die zuvor besprochenen Ergebnisse der Untersuchung in Kapitel 4.2 zeigten, dass für die Zuordnung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zu detektierten Schallsignalen, die WPF eine Schlüsselrolle einnehmen wird. Die WPF wird später mit anderen Schallemissionsparametern kombiniert interpretiert und dargestellt. Für die jetzt kommenden Ergebnisse ist die Darstellung der Schallemissionssignale über die WPF ausreichend, um die Unterschiede der Schallemissionen und deren Clusterbildung je nach Probenzusammensetzung und Versuchsdurchführung (Lagenanzahl, Lagenaufbau, konventionell gegenüber zyklischer Versuchsdurchführung) zu ermitteln. Bei der Laminatreihe 471–473 steht der Vergleich der konventionellen und zyklischen Versuchsdurchführung im Fokus.

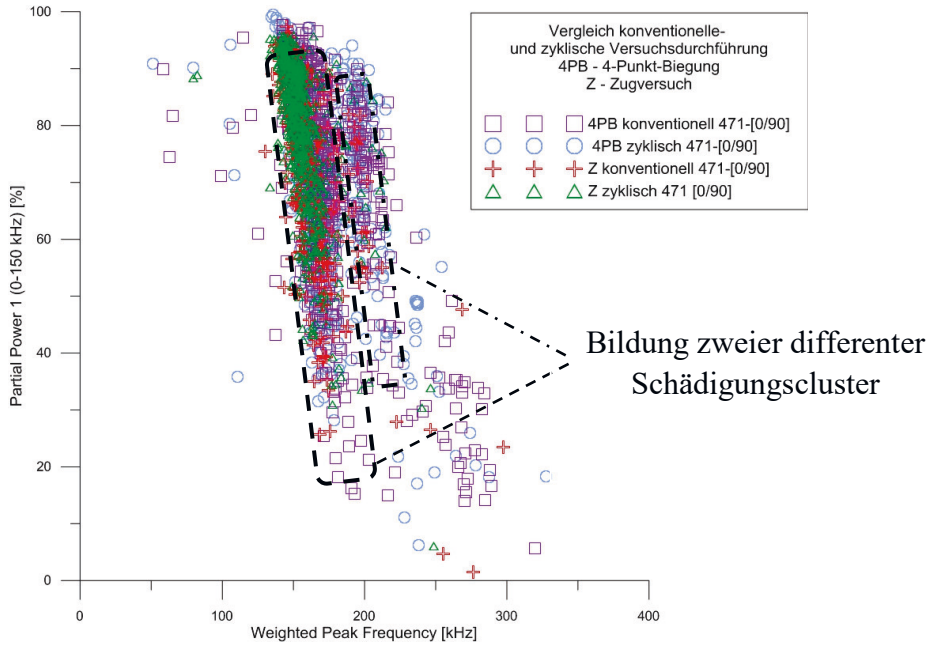


Abbildung 4.3-1 Vergleich Schallemissionsverhalten für konventionelle und zyklische Versuchsdurchführung, Laminat 471

Wie aus Abbildung 4.3-1 zu erkennen ist, ist kein elementarer Unterschied bei der Schallemissionssignalaktivität zwischen konventionellen und zyklischen Versuchsdurchführungen bei Zug- und 4-Punkt-Biegeversuchen bei Proben mit einem 0/90° Lagenaufbau festzustellen. Jedoch deutet sich ein Unterschied bei der Schallemissionsaktivität und Intensität der Clusterbildung zwischen den Zug-und 4-Punkt-Biegeversuchen ab. Für den quasiisotropen Lagenaufbau ist diese Aussage in Abbildung 4.3-2 verdeutlicht. Zur besseren Auflösung der Messergebnisse werden hier lediglich die Ergebnisse der Zugversuche grafisch dargestellt.

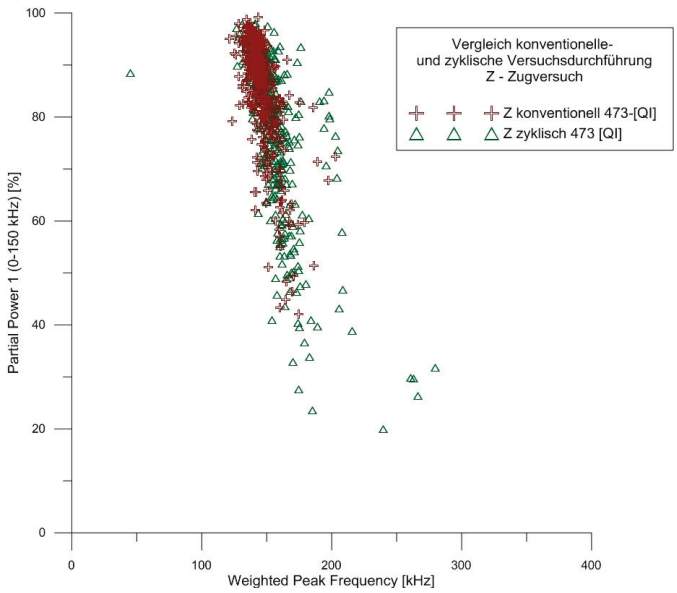


Abbildung 4.3-2 AE-Verhalten konventioneller und zyklischer Zugversuch, Laminat 473

Bei den zyklischen Versuchen sind vereinzelt auch Schallemissionsereignisse im niedrigeren Bereich der partiellen Leistung gemessen worden. Dies kann auf eine Veränderung des Schädigungszustandes durch die zyklischen Versuchsrampen deuten. Im niederfrequenten Bereich können diese Events als Reibvorgänge bestehender Schädigungszonen interpretiert werden. Für die Probe aus dieser Laminatreihe mit einem ±45° Lagenaufbau (Laminat 472) konnte ein unübliches Schädigungsmuster und Komplettversagen der Proben gemessen werden. Hierzu muss die Probenentnahme, wie in Abbildung 4.3-3 dargestellt ist erläutert werden. Die Proben wurden nebeneinander aus ein und derselben Grundplatte entnommen. Das erkennbare Schadensbild dieser Proben, nach durchgeführten Zugversuchen, und deren Übereinstimmung mit den Häufungen der

Abbildung 4.3-3 Schadensmuster in fehlerhaftem Laminat 472 bei Zugproben 1-5

Schallemissionssignale (Abbildung 4.3-4) in den jeweiligen Hauptschädigungsbereichen lässt auf einen fertigungsbedingten Fehler in der Plattenherstellung schließen. Ein solch zufällig entdeckter Materialfehler in der Grundplatte weist endgültig die gute und reproduzierbare Ankopplung der Sensoren bei den gewählten Versuchskonfigurationen nach.

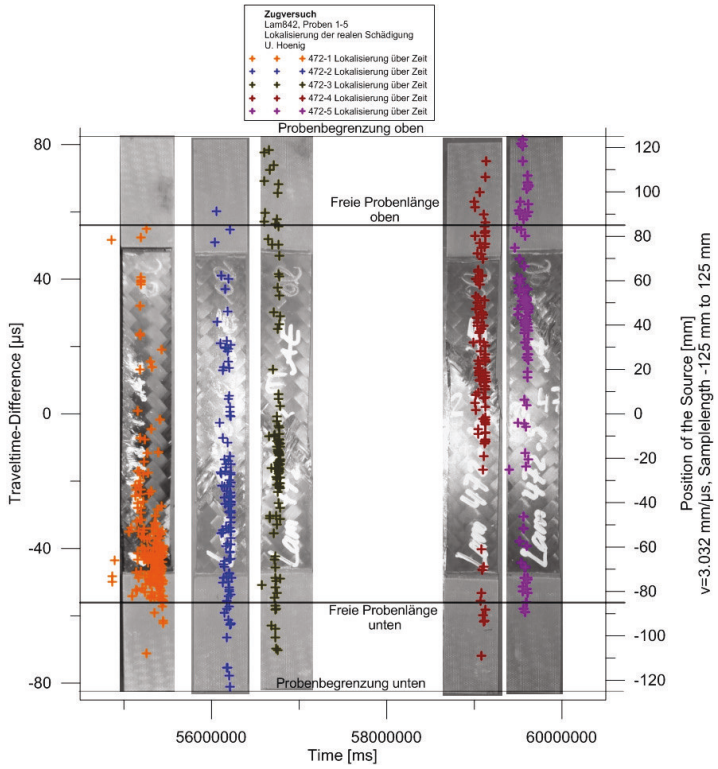


Abbildung 4.3-4 Lokalisierung und Vergleich mit realem Schadensbild von fehlerhaftem Laminat 472

Ebenfalls ist dies ein Nachweis für die sehr gut funktionierende Ortung der Schallemissionsquellen, die hier lediglich über der Messzeit aufgetragen sind. Aus den Schallemissionsmessungen des Laminats 472 konnten keine weiteren Erkenntnisse hinsichtlich des zyklisch oder konventionell gesteuerten Versuchsprogramms für die Schallemissionsmessung abgeleitet werden. Die Untersuchungen an den Laminaten 522 (0/90°) und 523 (QI) ergeben eine höhere Schallemissionsaktivität bei einem zyklischen Versuchsregime bei Zugversuchen. In Abbildung 4.3-5 ist die höhere Anzahl der Schallemissionen deutlich zu erkennen.

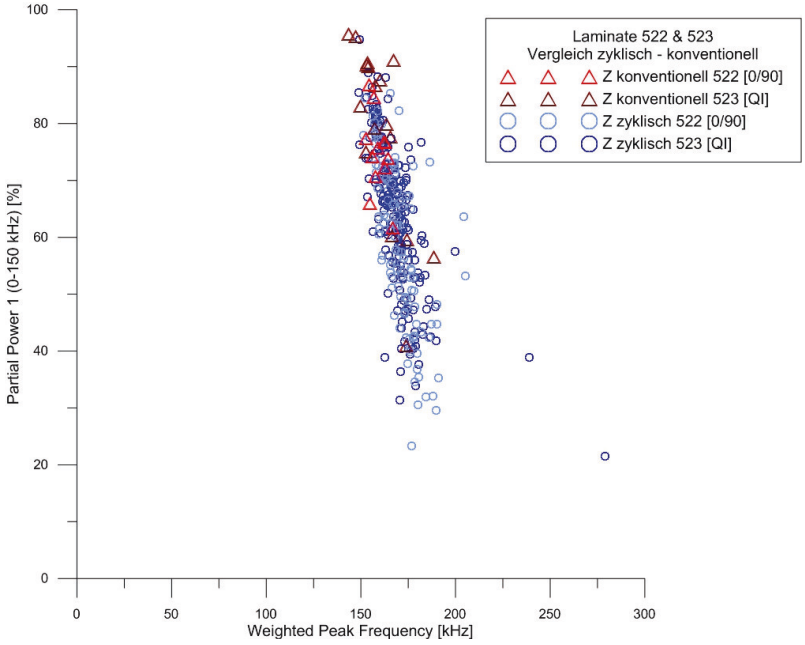


Abbildung 4.3-5 Vergleich zyklischer und konventioneller Zugversuch für Laminat 522 und 523

Wenn die Möglichkeit bestehen bleiben soll, Ratios bei Messergebnissen bilden zu können, die auf Probenebene erzeugt werden, ist es unabdingbar, eine zyklische Versuchsdurchführung zu wählen, um Aussagen bezüglich des Schädigungsgrades treffen zu können. Teilweise ergeben zyklische Versuche eine höhere Anzahl an analysierbaren Schallemissionen, was als weiteres Indiz für die zyklischen Versuche spricht. Allerdings verändern zyklische Belastungen in der Probe auch das Spannungsverhältnis unter Last und sie sind damit nicht mehr mit den Materialkennwerten der konventionell durchgeführten Versuche zu vergleichen. Auch verändern sich die Schädigungsmechanismen im Vergleich zur Standardprüfung. Da der Fokus dieser Arbeit aber auf der Zuordnung von Schallemissionsparametern zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen ist, werden alle weiteren Versuchsreihen zyklisch durchgeführt.

4.3.2 Vergleich des Schallemissionsverhaltens in Abhängigkeit der Lagenanzahl

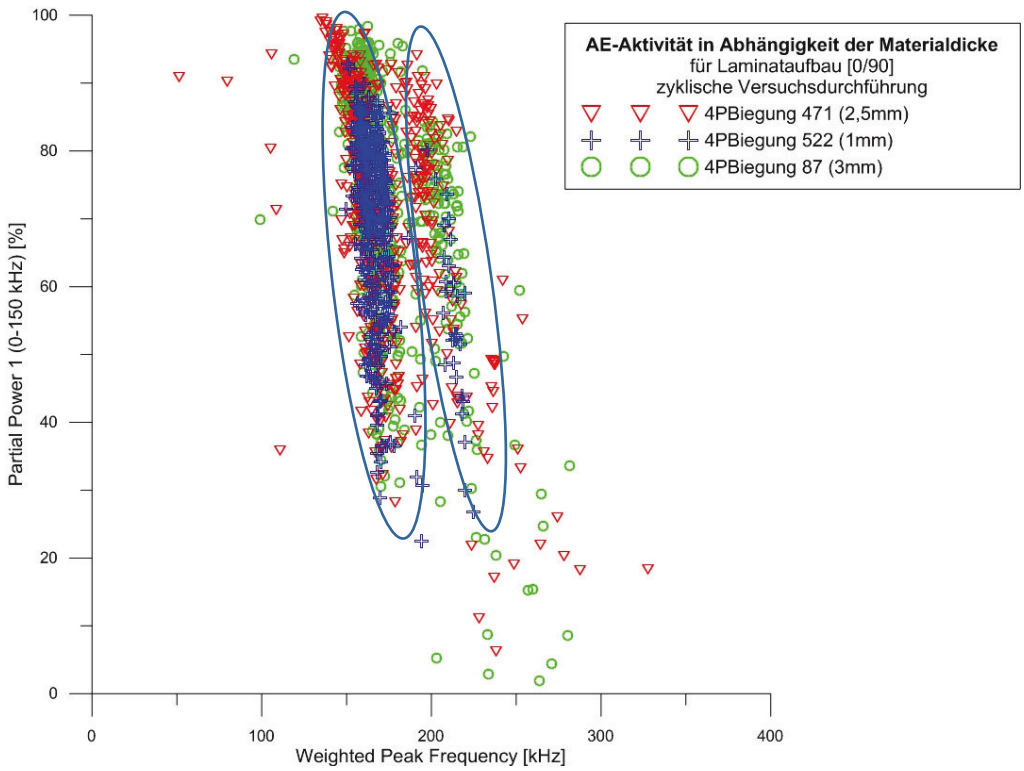


Abbildung 4.3-6 Einfluss der Probendicke auf die Schallemissionsergebnisse bei 4-Punkt-Biegeproben

In Abbildung 4.3-6 ist der Einfluss der Probendicke exemplarisch für 4-Punkt-Biegeproben mit einem Lagenaufbau von 0/90° dargestellt. Laminat 471 und 87 bestehen aus 8 Lagen und Laminat 522 aus vier Lagen. Der Dickenunterschied bei den Laminaten mit jeweils 8 Lagen im Aufbau ist auf eine unterschiedliche Höhe des Halbzeuges und andere Fertigungsparameter zurück zu führen. Mit dem Abgleich der Betriebsdaten (Anhang Abbildung 1) dieser Versuche wird deutlich, dass die Schallemissionsaktivität bei höheren Lasten ansteigt. Laminate mit einem größeren Querschnitt, was wiederum auf eine höhere Anzahl an Lagen zurück zu führen ist, weisen im Vergleich zu Laminaten aus derselben Werkstoffkombination mit geringerem Querschnitt höhere Festigkeitswerte auf. Dies führt bei der Prüfung zu einer tendenziell höheren Schallemissionsaktivität. Eine zu große Dicke der Probe ist speziell für Zugversuche ungeeignet, da zu hohe Kennwerte im Werkstoff erreicht werden können und man dadurch mit der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine nicht bis zum Versagen der Probe fahren kann.

Teilweise verschwimmen bei zu dicken Proben die Cluster und die Analyse und Interpretation der Messdaten ist dementsprechend schwierig. Folglich ist für den hier betrachteten Fall von 2mm zu wählen, sodass ausreichend Schallemissionsaktivität zu erwarten ist, und mit dem gewählten Versuchsprogramm alle Schädigungsmechanismen vorkommen und gemessen werden können.

4.3.3 Vergleich des Schallemissionsverhaltens in Abhängigkeit des Lagenaufbaus

Folgend werden die Ergebnisse von zyklischen Zugversuchen in Abhängigkeit des Lagenaufbaus erläutert. Hierzu wurden Laminate verwendet, die aus derselben Faser-Matrixkombination bestehen und sich lediglich in der Orientierung der einzelnen Faserlagen unterscheiden. Das teilweise sehr differente Verhalten hinsichtlich des Schallemissionsverhaltens ist in nachfolgender Abbildung 4.3-7 zu sehen.

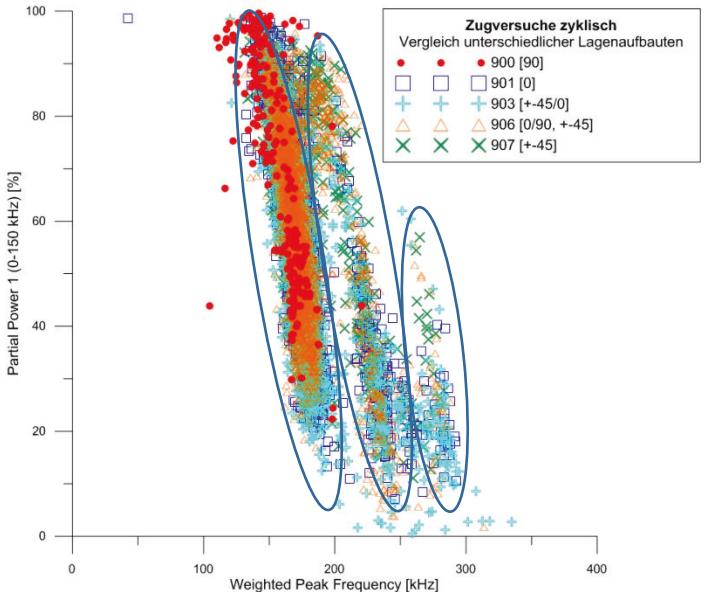


Abbildung 4.3-7 Clusterbildung in Abhängigkeit des Laminataufbaus

Es wird deutlich, dass die Schallemissionen sich bei Schädigung des Werkstoffes nicht bei allen Lagenaufbauten Cluster in der gewählten WPF-PP-Plot Darstellung ausbilden. Jedoch bilden sich in der Gesamtdarstellung aller untersuchten Lagenaufbauten die erwarteten drei Cluster. In Laminaten mit einem eher komplexen Lagenaufbau (z.B. QI oder angelehnt an QI), können Schädigungsmechanismen angeregt werden, die sich bei der Frequenzausbildung in allen drei Clustern wiederfinden. Dies lässt den Schluss zu, dass sowohl die matrixdominierten, die faser-matrixkombinierten und die faserdominierten Schädigungsmechanismen analysiert und dargestellt werden können. Ein weiteres Indiz hierfür sind die Ergebnisse des Lagenaufbaus von 90° und 0°. Das Laminat 900 mit dem 90° Aufbau, bei dem orthogonal zur Faserorientierung bei den Zugversuchen die Kraft eingeleitet wird, bildet lediglich ein Cluster aus. Da es sich um das erste Cluster handelt, was den matrixdominierten Versagensmechanismen zugeordnet wird, sind die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse schlüssig. Gestützt wird diese These von den Ergebnissen des Laminates 901 (0°), bei dem in Faserorientierung die Zugbelastung eingebracht wurde (Abbildung 4.3-8).

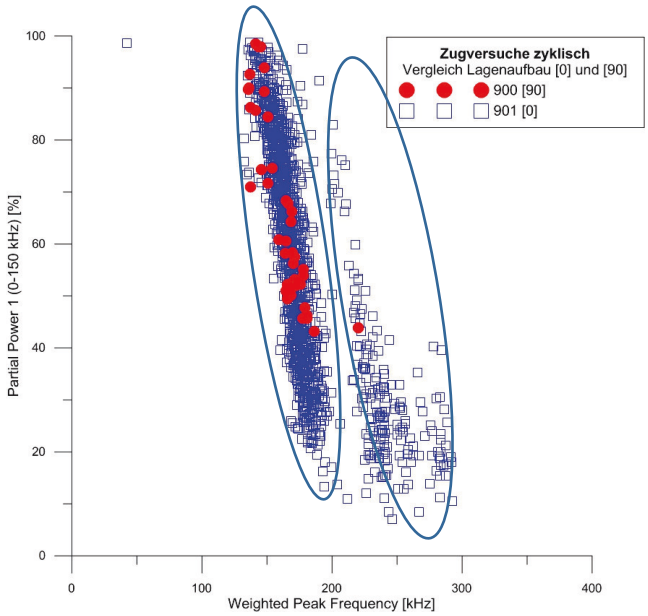


Abbildung 4.3-8 Vergleichende Clusterbildung von Laminaten mit Lagenaufbau 0° und 90°

Man spricht bei dieser Faserorientierung auch von Laminaten mit einem unidirektionalen Aufbau. Die Ergebnisse, bei denen in Faserrichtung die Last eingeleitet wurde, bilden zwei weitere Cluster aus. Somit gibt es bei diesem Belastungsregime sehr wahrscheinlich auch Anteile von Schädigungsmechanismen im Bereich der Faser-Matrixinteraktion und bei den faserdominierten Mechanismen. Bisherige Forschungsergebnisse stützen diese Ergebnisse [32]. Dort ist beim zweiten Cluster vom Versagen im Interfacebereich (z.B. Debonding oder Pull-Out) und im dritten Cluster vom Versagen der Faser oder Faserbündel auszugehen. Beim unidirektionalen Laminataufbau bildet sich jedoch das dritte Cluster zu schlecht aus, sodass in zukünftigen Untersuchungen, speziell bei der Analyse des dritten Clusters, zusätzlich die Schallemissionsanalyse von Laminaten mit andern Lagenaufbauten herangezogen wird. Stellt man die Ergebnisse der Schallemissionsmessung bei zyklischen Zug- und Biegeversuchen über alle geprüften, unterschiedlichen Lagenaufbauten in einer Grafik dar, wird deutlich, wie different sich die verschiedenen Schallemissionscluster ausbilden. Abbildung 4.3-9 und Abbildung 4.3-10 sollen ein tieferes Verständnis für die Ausbildung der Schallemissionscluster geben. Es wird der gewohnte WPF-PP-Plot der Schallemissionsereignisse in einer dreidimensionalen Darstellungsvariante verwendet.

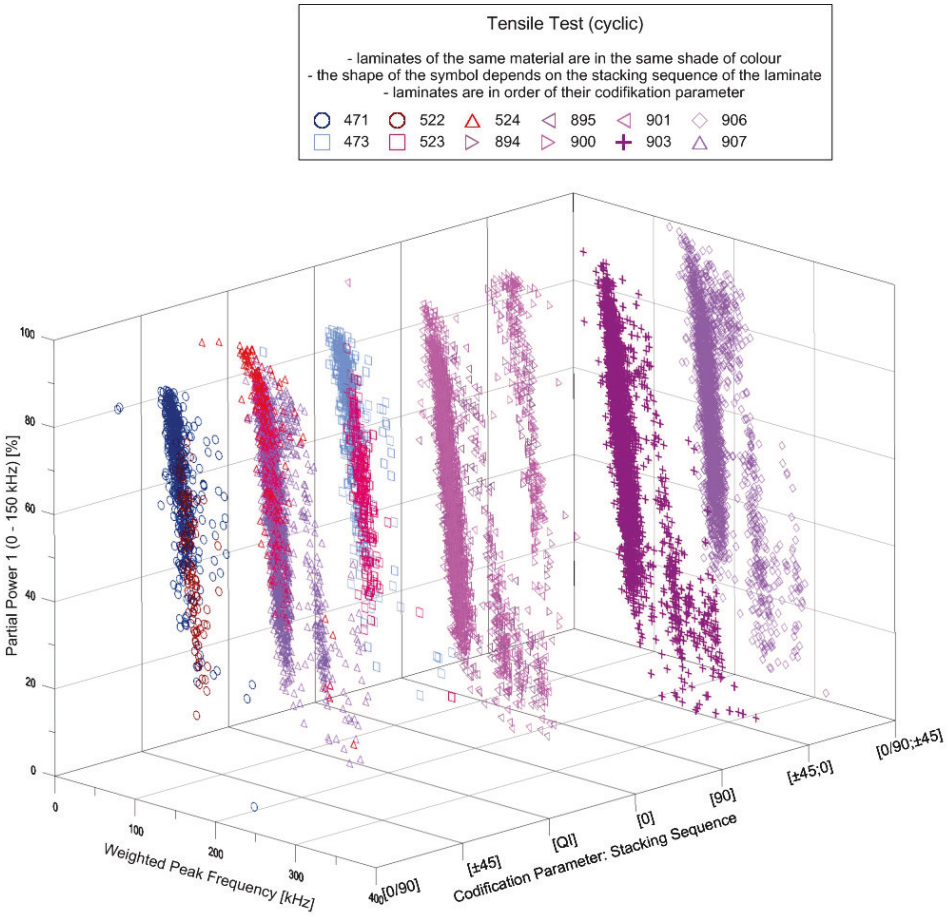


Abbildung 4.3-9 3D-Darstellung Schallemissionscluster in Abhängigkeit des Lagenaufbaus bei Zugversuchen

Die lagenaufbauabhängigen Cluster für die Schallemissionen bei Zugversuchen bilden sich bei den meisten Varianten wie erwartet aus. Bei 0°, ±45°;0° und 0/90°;±45° bildeten sich alle drei Cluster aus. Dies deutet auf matrixdominante Schädigungsmechanismen, faser-matrixkombinierte Schädigungsmechanismen und zuletzt auf die faserdominierten Schädigungsmechanismen hin. Beim 0/90° Aufbau bildete sich das erwartete dritte Cluster nicht aus, was auf das Nichtversagen der Proben aufgrund der hochfesten Fasern zurückgeführt werden kann. Bei den quasiisotropen Proben fehlt ebenfalls das dritte Cluster mit den hochfrequenten, gewichteten Frequenzanteilen, was gemäß Literatur für die faserdominierten Schädigungsmechanismen steht. Genau gegensätzlich verhält es sich mit den Ergebnissen der Proben mit ±45° Lagenaufbau. Hier bildet sich unerwarteter Weise ein drittes Cluster. Dieses Cluster ist nicht stark ausgeprägt und könnte seinen Ursprung in der geringen Faserfestigkeit haben. Bei Laminaten mit 90° Faserorientierung zur Krafteinleitung stellt sich, wie bereits dargestellt, hauptsächlich das erste Cluster heraus, welches für die matrixdominierten Schädigungsmechanismen steht. Für die zyklischen Zugversuche kann folglich festgehalten werden, dass die Clusterbildung weitestgehend mit den lagenaufbauabhängigen, erwarteten Schädigungen übereinstimmt.

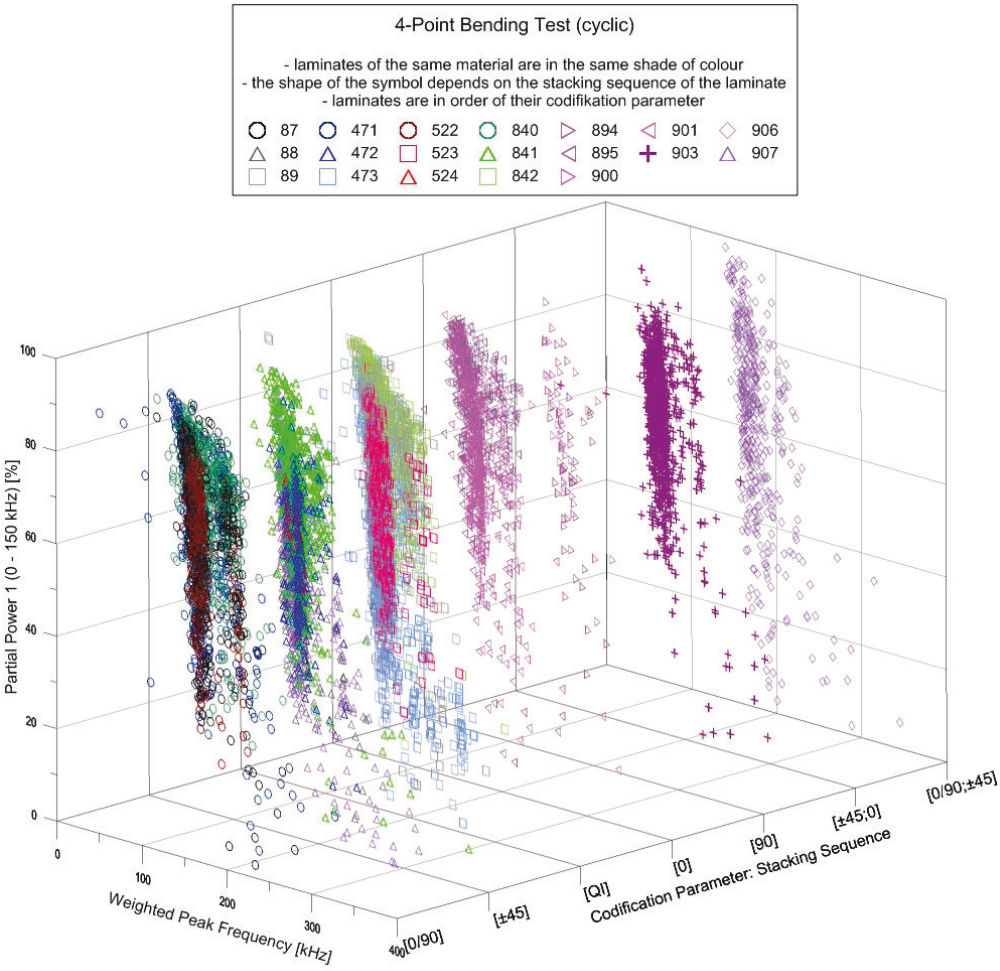


Abbildung 4.3-10 3D-Darstellung Schallemissionscluster in Abhängigkeit des Lagenaufbaus bei 4PB-Versuchen

Für die Clusterbildung der Schallemissionen während der 4-Punkt-Biegeversuche stellt sich ein ähnliches Bild wie bei denen der Zugversuche dar. Tendenziell stimmen die erwarteten Schädigungsmechanismen für diese Art der Belastung in einer Probe mit der Clusterbildung und mit der damit verbundenen Zuordnung der verschiedenen Schädigungsarten nach [12] besser überein als die der Zugversuche. So liefern die Schallemissionen der Proben mit den Lagenaufbauten 0/90°, ±45° und QI jeweils Cluster in allen drei Schädigungsklassen. Die Proben mit den Lagenaufbauten ±45°;0°, 0/90° und 0° bilden jeweils die ersten zwei Cluster gut aus und das dritte wird angedeutet. Dies war für ±45°;0° und 0/90° Lagenaufbauten so erwartet und lediglich bei den Proben mit einer 0° Faserorientierung wurde die Erwartung hinsichtlich einem stärker ausgeprägten dritten Cluster nicht erfüllt. Folglich war der Anteil der faserdominierenden Schädigungsmechanismen geringer, oder konnte nicht detektiert werden. Bei den Proben mit 90° Faserorientierung bildete sich analog zu den Zugversuchen das erste Cluster, stehend für die matrixdominierten Schädigungsmechanismen, in Kombination mit einigen wenigen Schallemissionsereignissen, die dem zweiten Cluster zugeordnet werden können, aus. Auch für die zyklischen 4-Punkt-Biegeversuche stimmt die je nach Schädigungsart abhängige Clusterausbildung der Schallemissionen beim WPF-PP-Plot mit den erwarteten Versagensarten überein.

4.3.4 Vergleich des Schallemissionsverhaltens in Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte der Materialien

Vergleicht man Laminate 471 und 522, beide mit einem Lagenaufbau von 0/90° (Abbildung 4.3-11), so sieht man, dass die WPF beider Laminate, trotz stark unterschiedlichem mechanischem Verhalten, in einem ähnlichen Bereich liegen. Die Clusterbildung, die sich je nach Schädigungsmechanismus über die Prüfzeit anders darstellt, ist zwischen diesen zwei Laminaten mit unterschiedlicher Versagenscharakteristik nicht zu vergleichen.

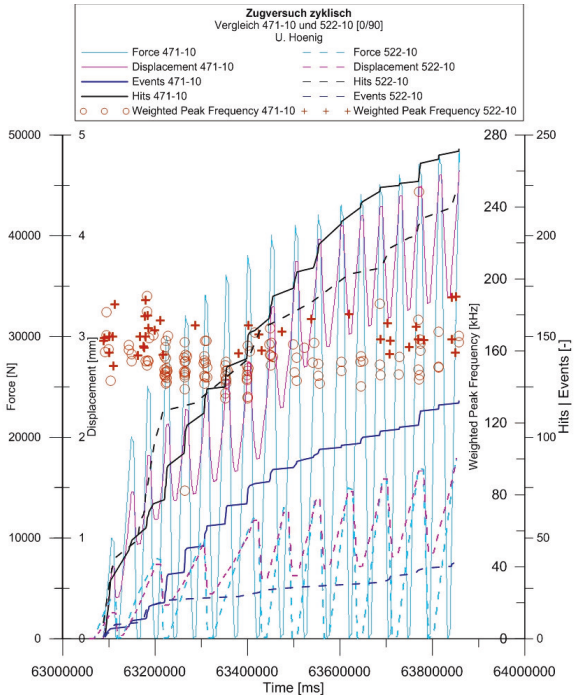


Abbildung 4.3-11 Vergleich akustisches und mechanisches Verhalten der Laminate 471 und 522

Somit entsteht die These, dass Faserverbundwerkstoffe, die sich aus vergleichbaren Werkstoffkombinationen zusammensetzen, auch eine ähnliche Charakteristik hinsichtlich ihrer Schallemissionsaktivität bei vorschädigenden oder schädigenden Belastungen aufweisen. Dieser potentielle Zusammenhang kann durch die Vorversuche nicht abschließend geklärt werden, wie die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuche der Laminate 471 und 840 zeigen. Die Laminate weisen ähnliche mechanische Kennwerte auf und haben beide denselben Lagenaufbau. Bei der Ergebnisdarstellung in Abbildung 4.3-12 bezüglich der Clusterausbildung, auch im Vergleich mit weiteren Laminaten, war kein signifikanter Unterschied bezüglich den unterschiedlichen Faser- und Matrixwerkstoffen und deren mechanischen Eigenschaften zu erkennen. Ein elementarer Einfluss hinsichtlich des Schallemissionsverhaltens aufgrund unterschiedlicher Werkstoffkombinationen in FVK konnte mit den Voruntersuchungen nicht nachgewiesen werden. Eine detailliertere Untersuchung mit einer gezielt eingebrachten Varianz der Materialkennwerte wird im Kapitel 4.11 erläutert. Im Anhang Tabelle 1 ist eine Übersicht der Materialien und deren Verwendungszweck zu finden, die hauptsächlich für die Vorversuche eingesetzt wurden.

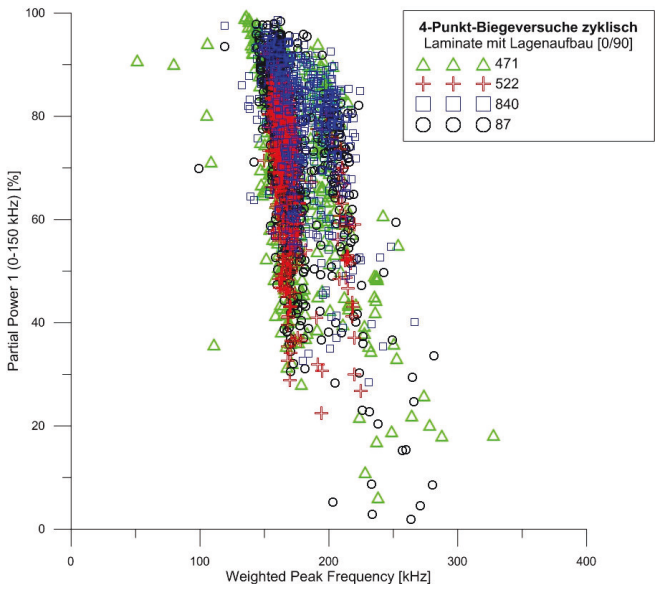


Abbildung 4.3-12 Vergleich Clusterbildung 4PB der Laminate mit Lagenaufbau 0/90°

4.4 Ableitung Versuchskonfiguration und Materialauswahl für nicht zerstörende Prüfung

Das Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, den verschiedenen Schädigungsmechanismen in FVK gewisse Schallemissionsparameter zuordnen zu können. Anhand der Ergebnisse der Vorversuche und den daraus gewonnenen Erkenntnissen, konnten Maßnahmen zur geeigneten Werkstoffauswahl hinsichtlich Lagenanzahl, Lagenaufbau und dem Versuchsregime abgeleitet werden, um gezielt einzelne Schädigungsmechanismen zu erzeugen und mit der Schallemissionsmesstechnik zu detektieren. Bisher wurden in den Versuchsreihen meist mehrere Schädigungsmechanismen auf einmal bei Belastung der Proben angeregt. Der Hauptfokus lag hierbei auf einer eindeutigen Trennung von matrixdominierten Schädigungsmechanismen, denen niederfrequente Anteile des Spektrums der WPF zugeordnet werden, zu faserdominierten Schädigungsmechanismen, die für hochfrequente Anteile der WPF stehen [12]. Somit fiel die Laminatauswahl auf verhältnismäßig einfache Lagenaufbauten. Aus den Vorversuchen war bekannt, dass vor allem die Laminate 900 [90°] und 901 [0°] eine eindeutige Trennung der Schädigungscluster aufwiesen. Daher wurden für die weiterführenden Versuche unidirektionale Proben mit einem Lagenaufbau mit einer 90° Faserorientierung und einer 0° Faserorientierung präpariert. Die Wahl fiel auf Laminat 384 und 390, beides 90° Aufbauten und Laminat 385 und 389 mit 0° Lagenaufbauten. Für 384 und 390 wurden hauptsächlich die matrixdominierten Schädigungsmechanismen erwartet und für 384 und 390 eine Clusterausbildung in allen drei Clustern mit dem Ziel, die faserdominierten Schädigungsmechanismen zu erfassen. Die Grundplatten der Proben waren vom selben Lieferanten. Sie setzten sich allerdings aus unterschiedlichen Fasermaterialien und Matrixmaterialien zusammen. Laminat 384 und 385 waren aus einer Werkstoffkombination und Laminat 389 und 390 auch.

Für diese Versuchsreihe kam eine zerstörende Prüfung der Proben nicht in Frage, da im Nachgang auf die Belastung die „vorgeschädigten“ Proben mit Hilfe einer Computertomographie untersucht werden sollten. Deshalb lehnte sich diese Versuchsdurchführung an der von Eaton und May an [33]. Hierbei wird die Last konventionell aufgebracht bis zu dem Zeitpunkt, bei dem charakteristische Schallemissionssignale (je nach

Schädigungsmechanismus) gemessen werden. Danach wird die Prüfung unmittelbar abgebrochen und die Probe entlastet. Es wurden sowohl die 4-Punkt-Biegeversuche als auch Zugversuche an diesen Proben durchgeführt.

Vor der CT-Untersuchung soll über eine Auswertung und Analyse der Schallemissionssignale hauptsächlich mit der WPF als Kriterium für den Schädigungsmechanismus dargestellt werden, da sich diese aus den Vorversuchen und der Literaturrecherche als wichtigstes Kriterium für die Zuordnung der Schädigungsmechanismen herausstellte. Normal gestaltete Proben werden bei der Prüfung über das ganze Volumen der Probe geschädigt. Es ist nicht vorherzusagen in welchen Bereich der Probe die Hauptschädigung eintreten wird. Zusätzlich ist das gezielte Tomographieren in breiten Querschnitten schwierig. Deshalb wurde die Probengeometrie abgeändert. Durch eine Taillierung der Proben in der Mitte der freien Einspann- und Auflagerlänge wurde ein Bereich der Probe vorgegeben, in dem aus Spannungsverteilungsgründen in der Probe der größte Anteil der Vorschädigungen eintreten sollte. Diese taillierten Proben wurden durch Wasserstrahlschneiden aus einer Grundplatte der gewünschten Materialien gefertigt (Anhang Abbildung 2).

Aufgrund der starken Schwächung der Proben durch die Taillierung wurden keine Aufleimer bei den Zugproben appliziert. Es war davon auszugehen, dass die Taillierung einen deutlich größeren Einfluss auf die Zugfestigkeit haben wird als die potentielle Schädigung durch die Spannbacken direkt auf der Probe. Zusätzlich wurde der Spanndruck reduziert, da das Versagen der Probe bei niedrigeren Kräften erwartet war. Für die exakte Lokalisierung der Ereignisse war es sehr wichtig, dass die Position der Sensorpaare bekannt ist und während der Versuche nicht verändert wird. Zusätzlich sorgte eine Markierung auf den Proben für das reproduzierbare Einspannen / Einlegen der Proben und es war möglich die “Lage“ (Einspannrichtung, Position während der Belastungsprüfung) der Probe während des Versuches für die nachfolgende CT-Untersuchung festzuhalten. Ziel dieser Maßnahmen war es, den Aufwand für die kostspieligen und zeittreibenden CT-Untersuchungen, durch einen kleinen definierten Bereich der erwarteten Hauptschädigung und eine eindeutige Lokalisierung, so gering als möglich zu gestalten.

Das Verhalten bezüglich den mechanischen Eigenschaften und der Schallemissionsaktivität bei taillierten Proben war zum Versuchsbeginn nicht bekannt. Deshalb wurde je Probenspezifikation eingangs eine Referenzprüfung durchgeführt, um die Versuchsdefinition passend anzugleichen. Als Abbruchkriterium der Versuche wurde die Detektion von Schallsignalen definiert. Die Versuchsdurchführung wird im Anhang näher erläutert (Anhang Tabelle 2 bis Anhang Tabelle 9). Um die Prüfung nach Detektion der gewünschten charakteristischen Schallemissionssignale abbrechen zu können, wurde die Prüfgeschwindigkeit und die elektrische Verstärkung verändert. Anhand dieser Ergebnisse ist ebenfalls festzustellen, dass die Anzahl der Schallereignisse steigt, je langsamer die Versuche gefahren werden.

Um matrixdominiertes Versagen der ausgewählten Laminate zu provozieren, wurde die 4-Punkt-Biegung ausgewählt. Bei Laminat 384 und 390 (beide 90° Faserorientierung zur Lasteinleitung) wurde somit dieselbe Versuchskonfiguration gewählt und Schritt für Schritt die Versuchsgeschwindigkeit minimiert, da bei den Versuchen trotz der höchsten Verstärkung keine Schallemissionssignale aufgezeichnet wurden. Die Laminate 385 und 390 mit einer Faserorientierung von 0° zur Lasteinleitung sollten Ergebnisse zu den faserdominierten Schädigungsmechanismen liefern. Die Vorversuche zeigten jedoch, dass bei den Belastungsversuchen mit einer 0° Faserorientierung in Richtung der Lasteinleitung nicht nur

faserdominierte Schädigungsmechanismen im vorerst zugeordneten Frequenzbereich aufgetreten sind, sondern auch Matrixversagen oder Debonding in den Clustern ausgebildet wurde. Deshalb wurde bei diesen Versuchen die Verstärkung so verringert, dass die amplitudenschwächeren Schallemissionssignale der matrixdominierten Schädigungsmechanismen durch einen quasi Filter eliminiert werden. Die Ergebnisse der Proben (Anhang Abbildung 3 bis Anhang Abbildung 10) zeigen eindeutig den Einfluss der verringerten elektrischen Verstärkung, die bei der Ermittlung des Abbruchzeitpunktes zu Hilfe genommen wurde. Die Verstärkung sollte nicht zu gering gewählt werden. Ansonsten führt die Eliminierung der matrixdominierten Schädigungsmechanismen zu einer unsensiblen Messtechnik und die faserdominierten Schädigungsmechanismen sind nicht mehr messtechnisch auflösbar. Das Vorgehen zur Ermittlung des Abbruchkriteriums bei den Zugversuchen war an das der 4-Punkt-Biegeversuche angelehnt. Jedoch war es vor allem bei den Proben mit 0° Lagenaufbau schwierig, den Zeitpunkt des Versuchsabbruches zu definieren, weil die Proben untereinander durch die Taillierung sehr unterschiedliche Zugfestigkeiten und daraus resultierend auch ebenso unterschiedliche Schallemissionsaktivitäten aufwiesen. Darüber hinaus ist die Reaktionszeit der Prüfmaschine sehr lange und teilweise versagten die vorgeschädigten Proben nach Abbruch des Versuches durch eine kurzfristige Überlastung der Probe oder beim Entlasten der Prüfmaschine aufgrund eines sich einstellenden anderen Spannungszustandes der Probe zwischen den Spannbacken.

4.4.1 Ergebnisse nicht zerstörende Prüfung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der nicht zerstörenden Belastungsversuche und das Vorgehen bei der Auswertung und Analyse der Schallemissionsparameter erläutert. Die Proben sollen im Nachgang an die mit der Schallemissionsmessung begleitete konventionelle, belastende Beanspruchung mit einem weiteren zerstörungsfreien Prüfverfahren untersucht werden. Es folgt somit eine Auswahl von Proben, die für den Abgleich der Schallemissionsparameter mit der bildgebenden CT-Untersuchung ausgewählt werden, da der finale Nachweis für komplexe Proben und Bauteile über ein zusätzliches zerstörungsfreies Prüfverfahren bisher noch nicht erbracht wurde. Gemäß dem Standardvorgehen bei der Schallemissionsmessung an Proben aus FVK muss zuerst die charakteristische Schallgeschwindigkeit der zu prüfenden Materialien berechnet werden. Dies erfolgt durch den reproduzierbaren HSU-Nielsen-Test. In diesem Zuge entstand die Übersicht (Anhang Tabelle 10) der Schallgeschwindigkeiten der bisher geprüften Laminate in Abhängigkeit ihres Lagenaufbaus, der Probenbreite und ihrer Geometrie. Es werden bei den unidirektionalen Lagenaufbauten entlang der Faser (0° Lagenaufbau) die höchsten Schallgeschwindigkeiten erreicht. Die zweitschnellste Schallgeschwindigkeit hat der Lagenaufbau 0/90° gefolgt vom quasiisotropen und dem ±45° Lagenaufbau. Die geringste Schallgeschwindigkeit und damit einhergehend höchste Schalldämpfung ist bei unidirektionaler Faserorientierung (90°-Lagenaufbau) gemessen worden. Somit ist die Schallausbreitung orthogonal zur Faserorientierung am langsamsten.

Der ausschlaggebende Schallemissionsparameter bei der Zuordnung von Schädigungsmechanismen ist die gewichtete Vorzugsfrequenz (WPF). Speziell bei dieser Versuchsreihe, bei der an den vorgeschädigten Proben eine CT-Untersuchung durchgeführt werden soll, ist die Lokalisierung der Schallemissionen von ebenso großer Relevanz. Zur Validierung des Versuchskonzeptes wurde überprüft, ob der vermutete Hauptschädigungsbereich (Taillierung) und die dazu gehörenden Schallemissionsparameter, in

diesem Fall hauptsächlich die WPF, deckungsgleich sind. Die Validierung soll exemplarisch durch die Darstellung der Ergebnisse der Biegeprobe 385-8 belegt werden. In Abbildung 4.4-1 sind die charakteristischen Schallemissionen im Kerbbereich grafisch aufbereitet. Die lineare Ortung (in Längsrichtung) funktioniert dabei sehr gut, da die lokalisierten Schallemissionsquellen mit dem tatsächlichen Schädigungsbereich übereinstimmen. Die Ortungsgenauigkeit der nicht taillierten Proben konnte somit auf die taillierten Proben übertragen werden.

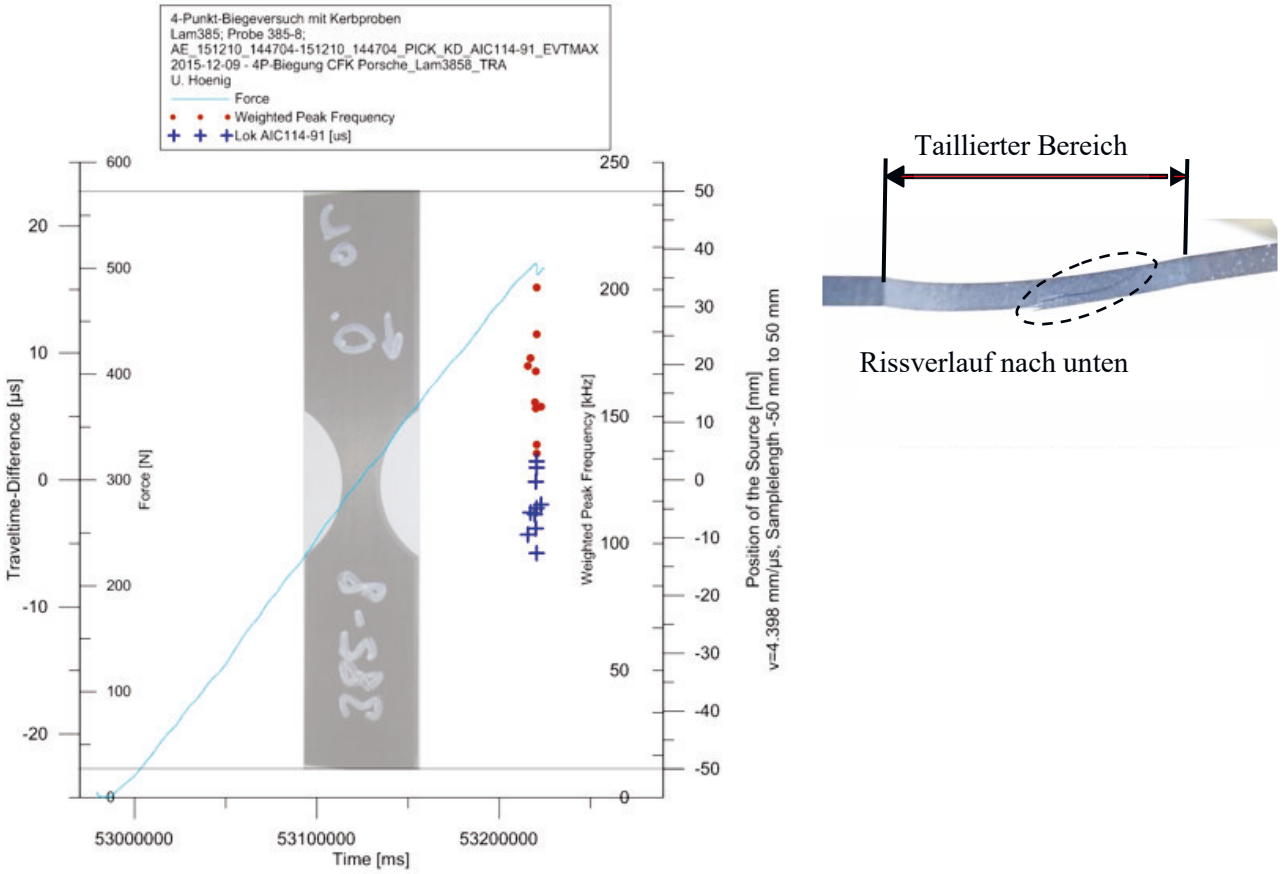


Abbildung 4.4-1 Biegeprobe 385-8 und akustisches Verhalten (links) / Abgleich Schadensbild im taillierten Bereich (rechts)

Bei den Proben wurden nun die Wellenformen des transienten Signals untersucht. Insbesondere bei den Biegeproben mit einem 90° Lagenaufbau gab es eine Häufung elektrischer Störsignale, die zunächst nicht erklärbar waren und eine sinnvolle Auswertung der Schallemissionssignale überflüssig machten. Ebenso wurde auf weiterführende CT-Untersuchungen bei Proben verzichtet, die eine große Anzahl an Events in unterschiedlichen WPF-Clustern aufgewiesen haben. Hier wäre es schwer geworden, dem Schallemissionsparameter eineindeutig ein Schadensbild via Tomographie zuzuordnen. Für den Nachweis von matrixdominierten Schädigungsmechanismen bei den Biegeproben wurden die Proben 384-4, 384-6 und 390-12 ausgewählt. In den folgenden Abbildung 4.4-2 und Abbildung 4.4-3 Abbildung 4.4-4 sind die jeweils transienten Signale und das dazu gehörende Schallemissionsverhalten dargestellt. Die vollständige Darstellung aller nach diesem Schema ausgewerteten Proben hinsichtlich des Schallemissionsverhaltens mit den dazu gehörenden transienten Signalen ist im Anhang unter Anhang Abbildung 3 bis Anhang Abbildung 20 zu finden.

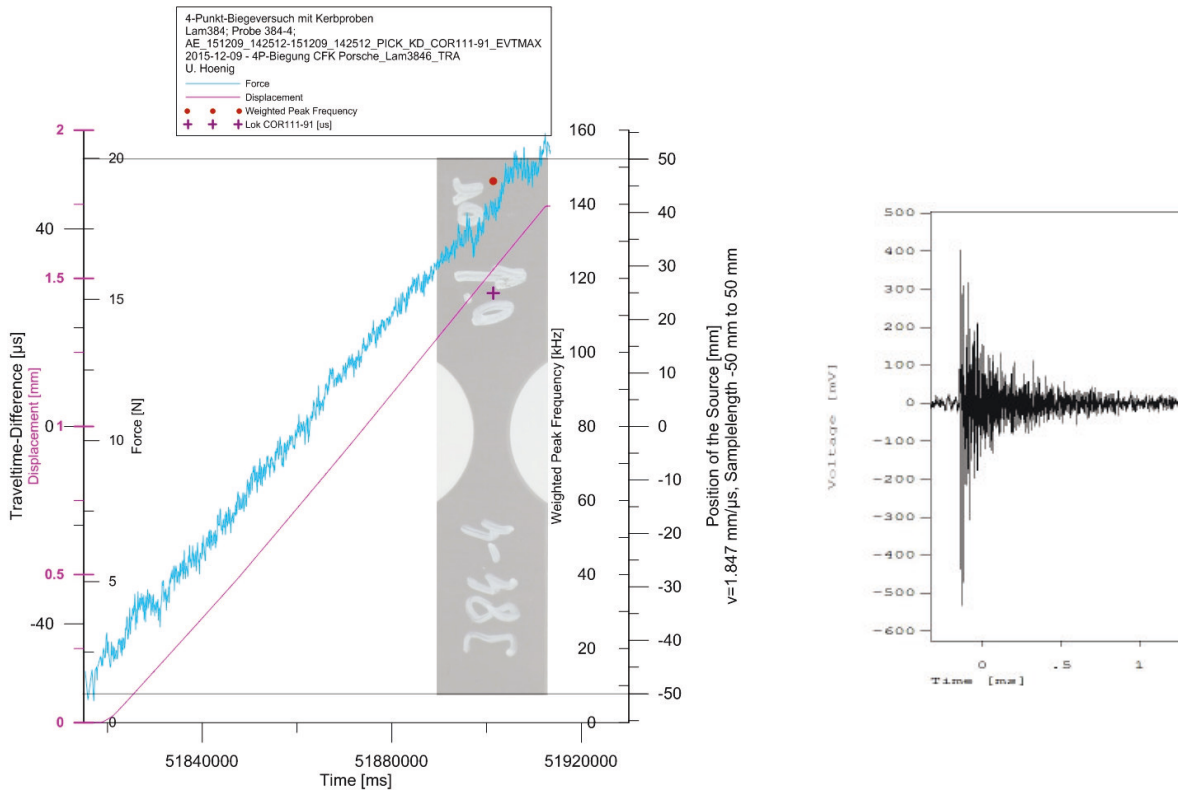


Abbildung 4.4-2 Biegeprobe 384-4 Schallemissionssignalverhalten (links) / transientes Signal (rechts)

Bei Biegeprobe 384-4 liegt das geortete Schallemissionsereignis bezüglich des WPF-Spektrums im Bereich der matrixdominierenden Schädigungsmechanismen. Allerdings kann das Schallemissionsereignis auch als „Grenzgänger“ zu den faser-matrixkombinierten Schädigungsmechanismen gewertet werden.

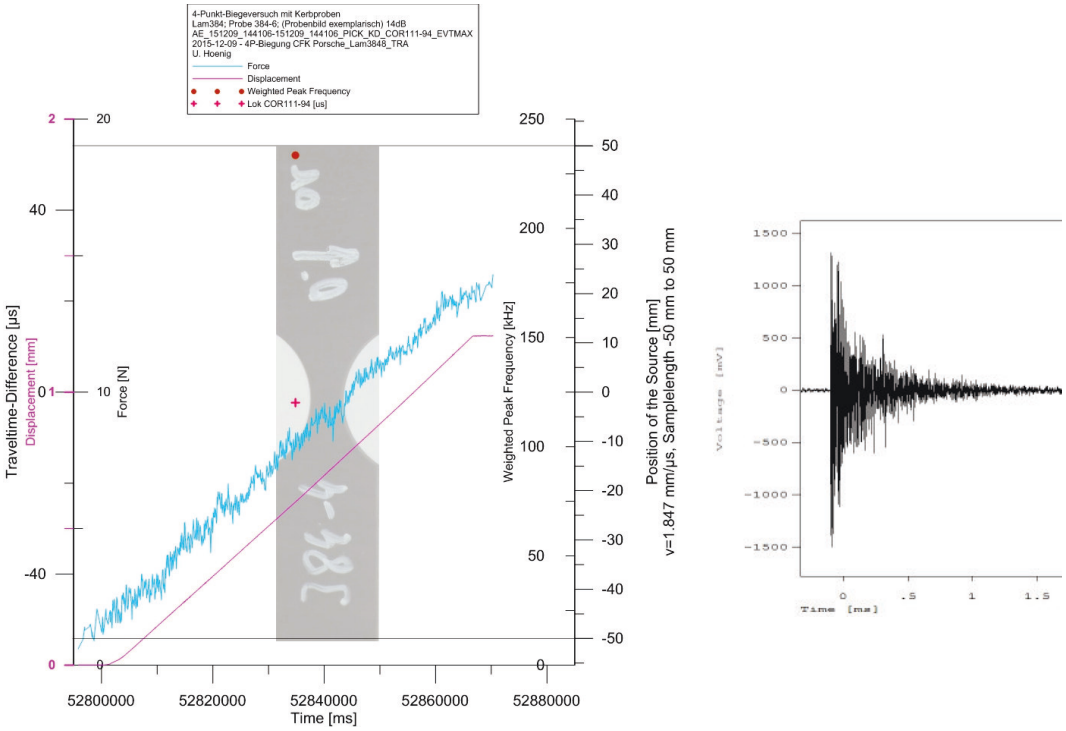


Abbildung 4.4-3 Biegeprobe 384-6 Schallemissionssignalverhalten (links) / transientes Signal (rechts)

In Probe 384-6 ist das lokalisierte Schallemissionsereignis im erwarteten taillierten, geschwächten Bereich. Das Schallemissionsereignis hat eine hohe WPF, was für ein faserdominiertes oder faser-matrixkombiniertes Schädigungsereignis spricht.

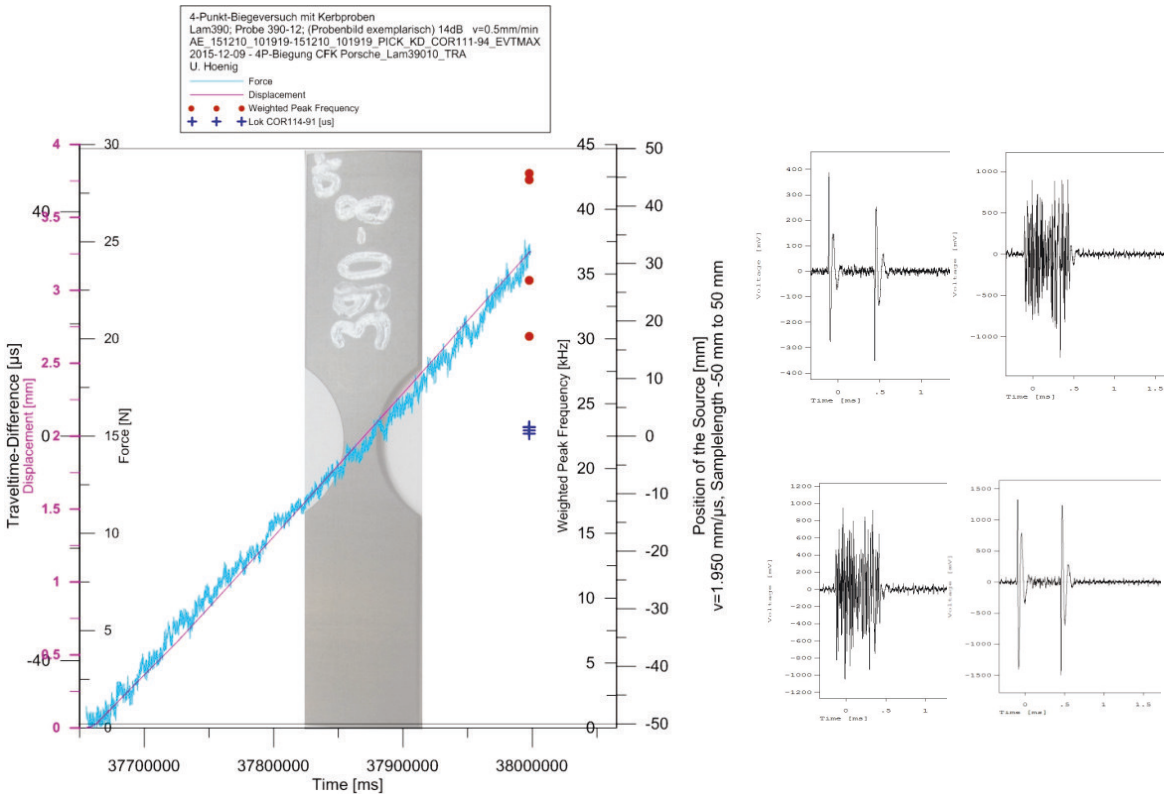


Abbildung 4.4-4 Biegeprobe 390-12 Schallemissionssignalverhalten (links) / transientes Signal mit Störung (rechts)

Die Untersuchung der transienten Signale bei Probe 390-12 ergab, dass alle zuvor als Events gewerteten Signale elektrische Störungen sein müssen. Eine CT-Untersuchung erschien trotzdem sinnvoll, da diese Probe im Vergleich zu anderen Proben dieser Spezifikation eine etwas höhere Biegebeanspruchung ohne Versagen überstanden hatte. Dies ließ den Schluss zu, dass Probe 390-12 in einem relativ hohen Maße vorgeschädigt sein musste, jedoch ohne mit der Schallemissionsmesstechnik Schallsignale detektiert zu haben. Mit den CT-Untersuchungen sollte den elektrischen Störungen auf den Grund gegangen werden und ein Zusammenhang hergestellt werden, weswegen die Messtechnik nicht bei „normalen“ Schädigungsvorgängen im Material die Schallsignale erfassen konnte. Die Messungen an Biegeproben mit einer 0° Faserorientierung verliefen ohne das Erfassen von Störsignalen. Hier sollten die erwarteten faserdominierten Schädigungsmechanismen eintreffen. Bei Probe 385-8 und 385-10 sind Schallemissionsereignisse mit hoher WPF gemessen worden. Sie unterschieden sich hauptsächlich in den Hauptschädigungsbereichen. Bei Probe 385-10 ließ die Lokalisierung der Schallsignale auf ein Versagen im Randbereich der Probe schließen und bei den Proben 389-6 bis 389-10 lokalisierte die Messtechnik die Schalleimissionsereignisse über den gesamtem Längsbereich. Bei allen Ereignissen bei diesen Proben ist die WPF im höherfrequenten Bereich, was auf matrix- und faserkombinierte Schädigungsmechanismen und reine faserdominierte Schädigungsmechanismen schließen ließ. Exemplarisch ist in Abbildung 4.4-5 das transiente Signal und das Schallemissionsverhalten der Probe dargestellt, die ein Schadensereignis in der Randzone vermuten lässt.

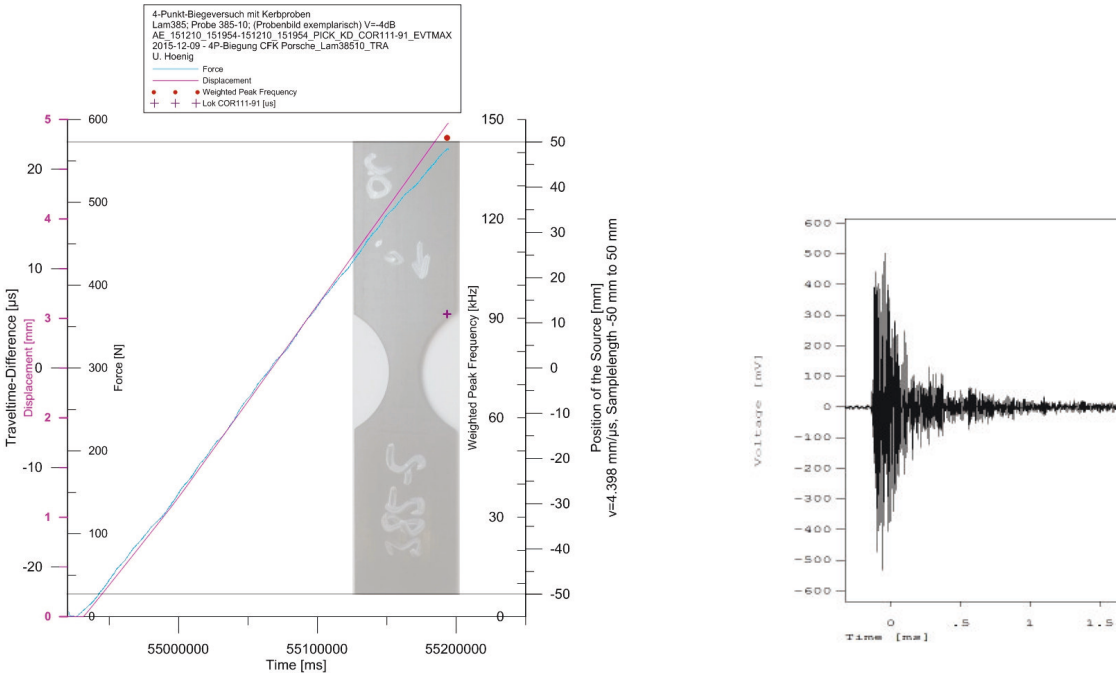


Abbildung 4.4-5 Biegeprobe 385-10 Schallemissionssignalverhalten (links) / transientes Signal (rechts)

Das Vorgehen für die taillierten Proben mit Zugbelastung war identisch zu dem der Biegeproben. Im ersten Schritt wurde genauso die Übereinstimmung der Schallsignale zum Versagensverhalten abgeglichen. In Abbildung 4.4-6 ist zu erkennen, wie für die Initialprobe 385-1 dieser Probenreihe eine sehr gute Übereinstimmung der Position der Probenschädigung und der georteten Quellorte der Schallereignisse darstellt. Wenn man den zeitlichen Verlauf der Schallemissionsereignisse betrachtet ist zu erkennen, dass kurz nach Versuchsstart einige Schallemissionsereignisse gemessen wurden und unmittelbar danach ein Kraftabfall zu verzeichnen ist. Dies kann ein Indiz für ein matrixdominiertes Schädigungsverhalten sein, da diese Probe zu dieser Zeit die Schallemissionssignale emittierte, die die geringsten WPF aufwiesen.

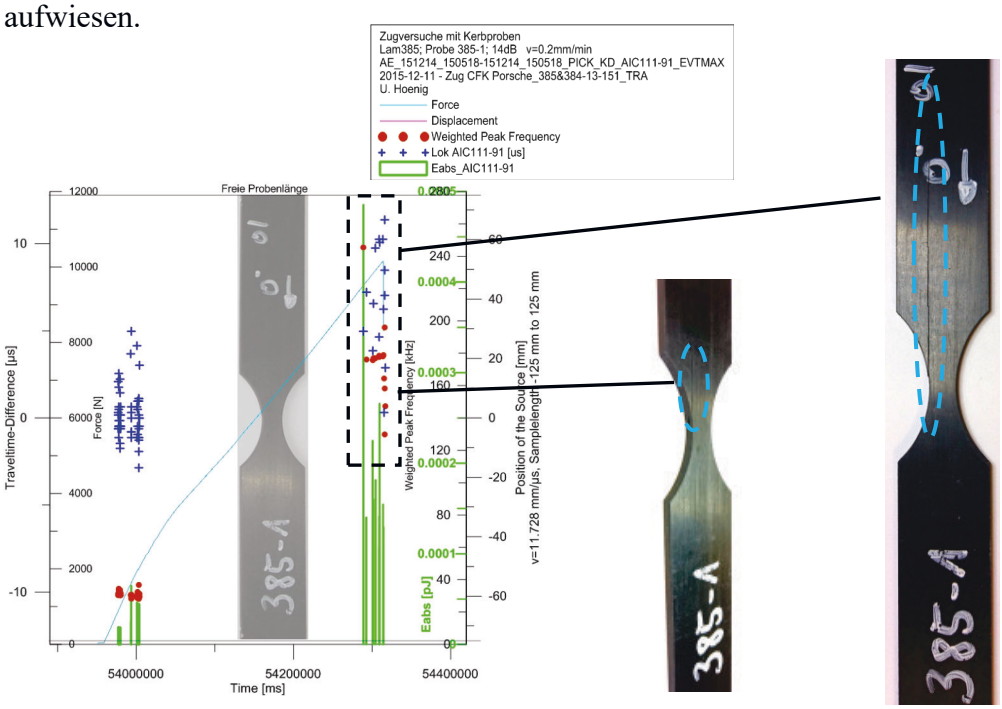


Abbildung 4.4-6 Zugprobe 385-1 Schallemissionsverhalten (links) / Vergleich Schadensbilder (rechts)

Nach Untersuchung der Wellenformen der transienten Signale analog zu dem Vorgehen der 4-Punkt-Biegeproben, stellte sich heraus, dass zu Beginn des Versuchs die Signale elektrische Störungen waren. Die Signale am Versuchsende hingegen waren keine elektrischen Störungen und die Frequenzspektren wiesen auf Schadensmechanismen im faser-matrixkombinierten Bereich und im faserdominierten Bereich hin. Rechts in den zwei Aufnahmen sind die makroskopischen Schäden erkennbar. Der in Belastungsrichtung sich ausbreitende Riss zeigt sichtbare Faserbrüche im taillierten Bereich der Probe und Faser-Matrixablösungen entlang der Faserorientierung. Der makroskopisch sichtbare Schaden, welcher aus mehreren Schadensmechanismen besteht, und die dazu übereinstimmende lineare Ortung der Schallsignale deuten abermals auf eine hohe Ortungsgenauigkeit hin. Die als zusätzlicher Schallemissionsparameter dargestellte Energie steigt gegen Versuchsende an. Das bedeutet, dass die einzelnen Schallemissionsereignisse deutlich mehr Energie umsetzen, was wiederum auf einen stärkeren Schädigungsgrad hinweist. Das Verhalten der absoluten Energie ist in diesem Fall vergleichbar mit der der WPF, die ebenfalls gegen Ende des Versuches ansteigt. Die Energie als Schallemissionsparameter kann allerdings ohne Einbezug zusätzlicher Parameter keine Aussage über den jeweiligen Schädigungsmechanismus treffen. Jedoch kann festgehalten werden, dass bei stärker werdendem Schädigungsgrad die absolut umgesetzte Energie ansteigt. Das absolute Energieniveau steigt folglich schadensabhängig an.

Nachdem die Übereinstimmung der Schallsignale zum Versagensverhalten nachgewiesen war, wurde, wie beim Vorgehen bei den taillierten 4-Punkt-Biegeproben, die Wellenform des transienten Signals und die WPF untersucht. Für weiterführende CT-Untersuchungen wurden bei Proben mit dem Lagenaufbau 90° die Proben 384-2, 384-4, 390-9 und 389-15 mit hauptsächlich matrixdominierten Schädigungsmechanismen, ausgewählt. Bei Probe 384-2 wurden 30 Schallemissionssignale gemessen. Nach Eliminierung der Störsignale blieben lediglich sechs Schallemissionsereignisse übrig. Trotz dieser elektrischen Störungen wurde Probe 384-2 für eine CT-Untersuchung ausgewählt, da die übrig gebliebenen Ereignisse im taillierten Hauptschädigungsbereich lagen (Abbildung 4.4-7) und vermeintlich einfach mit der CT zu detektieren sind.

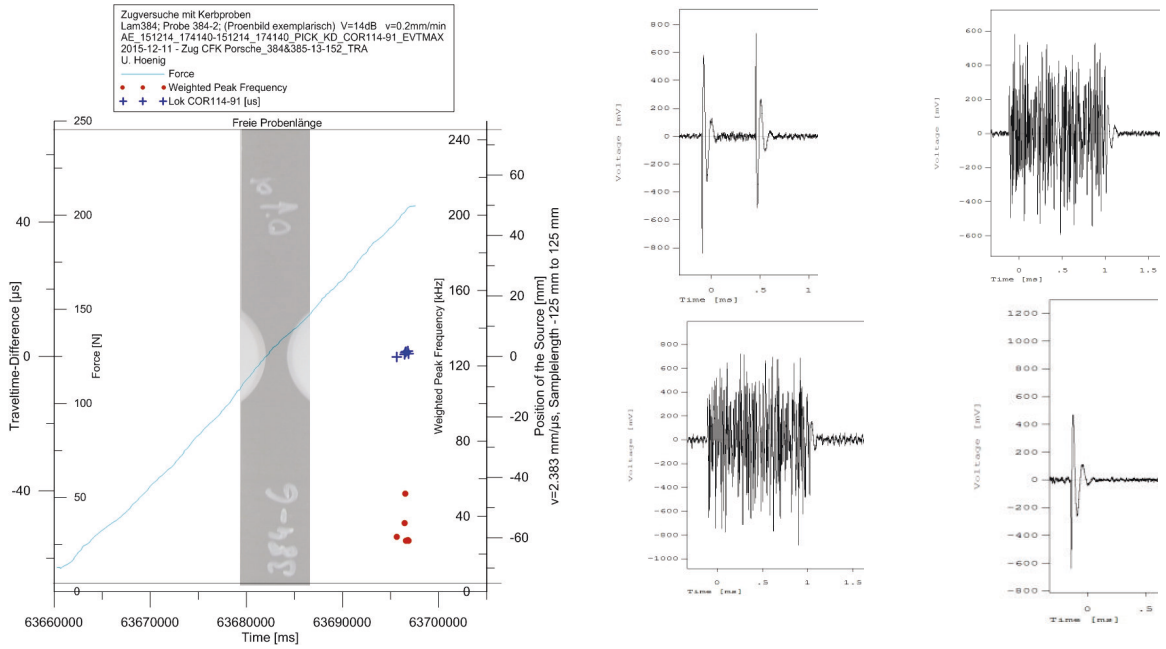


Abbildung 4.4-7 Zugprobe 384-2 Schallemissionssignalverhalten (links) / transiente Signale (rechts)

Falls sich durch die CT-Aufnahmen Schadensbilder im taillierten Bereich detektieren ließen, so würde das auf eine Signalüberlagerung resultierend in einer fehlerbehafteten Triggerung der Signale hindeuten. Dies wäre ein wichtiger Hinweis, da bei der aktuell gewählten Messkonfiguration- und Einstellung Schallemissionssignale verloren gingen. Bei der Untersuchung der Wellenform des transienten Signals bei Probe 384-4 konnte nicht abschließend geklärt werden, ob es sich um Störungen handelt. Jedoch war die WPF des zweiten Schallemissionsereignisses und seine Position für einen zu erwartenden Matrixriss eher untypisch, weswegen diese Probe gleichermaßen für die CT-Untersuchung ausgewählt wurde. Die Probe 390-9 erreichte ein nicht erwartet hohes Belastungsniveau. Schallemissionsmesstechnisch wurden wie bei den anderen Proben elektrische Störungen erfasst. Jedoch kann aufgrund des hohen Belastungsniveaus von einer Schädigung der Probe ausgegangen werden. In Kombination mit einem Schallemissionsereignis, mit einer für diesen Lagenaufbau sehr hohen WPF, wurde diese Probe für eine CT-Untersuchung interessant. Die Probe 389-15, wie in Abbildung 4.4-8 dargestellt, soll als Referenzprobe zu den anderen Proben von Laminaten mit einer Faserorientierung von 90° untersucht werden.

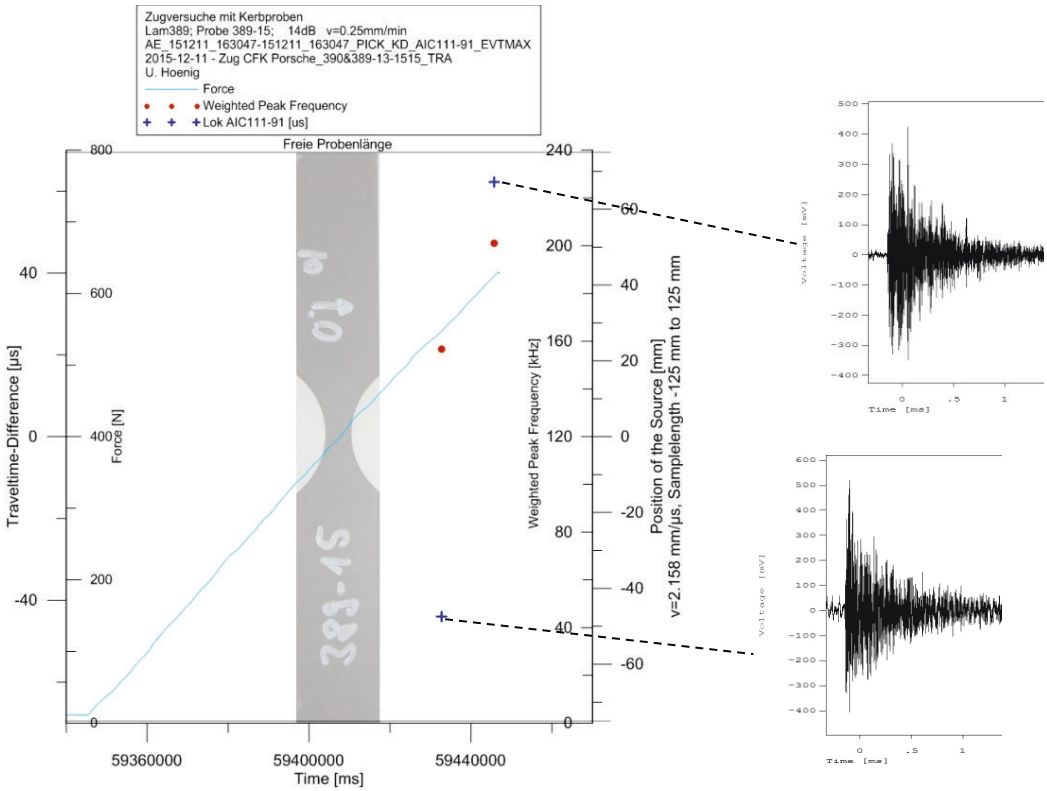


Abbildung 4.4-8 Zugprobe 389-15 Schallemissionssignalverhalten (links) / transiente Signale (rechts)

In der Probe wurde sowohl ein Schallemissionsereignis mit hoher WPF als auch eines mit niedriger WPF erfasst, was die Vergleichbarkeit aufgrund ihres akustischen Verhaltens zu den zuvor ausgewählten Proben ermöglichte. Für die taillierten Zugproben sind die Proben 385-6, 385-8, 385-10, 385-11, 384-14 und 389-8 für weiterführende CT-Untersuchungen interessant. Die Auswertung der Probe 385-6 hinsichtlich der Wellenform der transienten Signale ergab keinen Hinweis auf elektrische Störungen und die letzten beiden Schallemissionsereignisse bei einem hohen Lastniveau in der Nähe des erwarteten Versagenspunktes (Taillierung) der Probe, wie in Abbildung 4.4-9 zu erkennen ist, sind der Grund für die CT-Untersuchung.

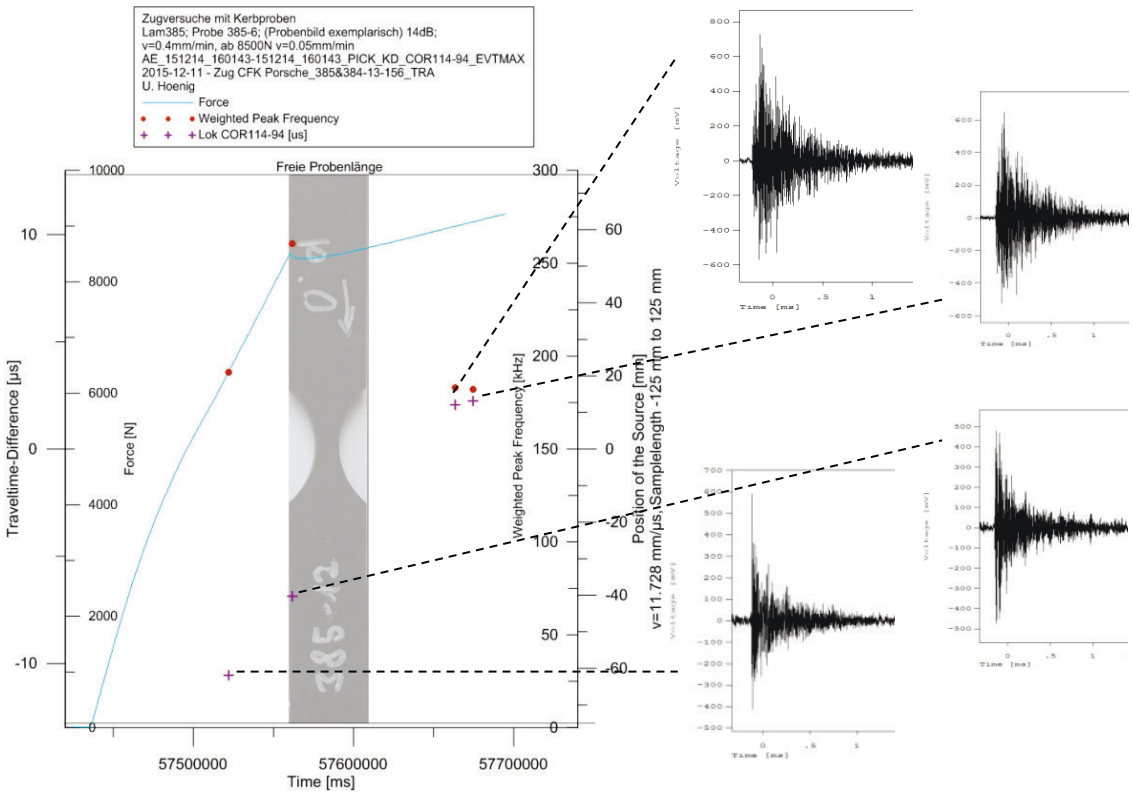


Abbildung 4.4-9 Zugprobe 385-6 Schallemissionssignalverhalten (links) / transiente Signale (rechts)

Ebenfalls ist das Schallemissionsereignis kurz bevor der temporäre Kraftabfall verzeichnet wurde interessant. Die CT-Untersuchung der Probe 385-8 soll die der Probe 385-6 verifizieren. In folgender Abbildung 4.4-10 sind die transienten Signale und das Schallemissionsverhalten der Probe 385-11 zu sehen. An dieser Probe konnten vergleichsweise viele Schallemissionsereignisse detektiert werden, die sich in der nachgeschalteten Auswertung zur Eliminierung von elektrischen Störungen auch als solche bestätigten. Die Probe war während der Versuchsdurchführung akustisch auch im hörbaren Frequenzspektrum aktiv, makroskopisch sichtbare Schäden konnten allerdings nicht identifiziert werden. Dies gab den Ausschlag für die CT-Untersuchung.

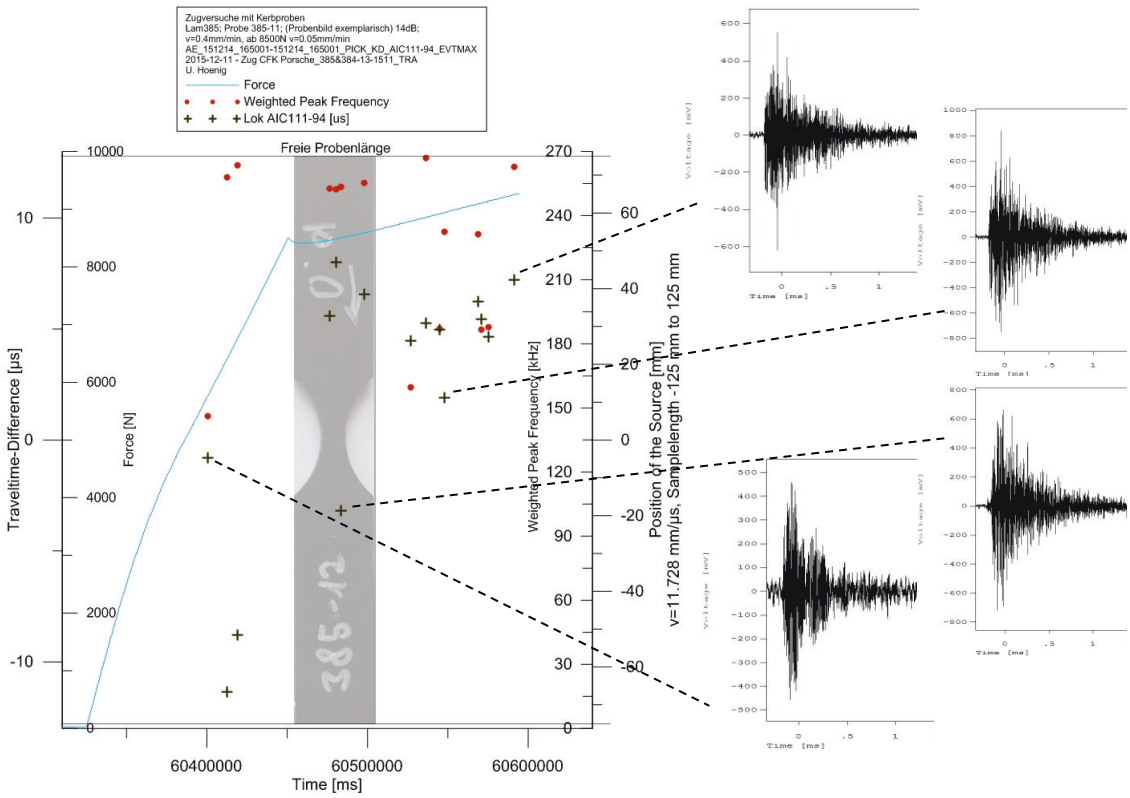


Abbildung 4.4-10 Zugprobe 385-11 Schallemissionssignalverhalten (links) / transiente Signale (rechts)

Die Probe 389-8 verhielt sich im Gegensatz zu den anderen Proben atypisch. Die Versuchsdurchführung war gekennzeichnet von einem verhältnismäßig frühen Kraftabfall. Dies kann ein Hinweis auf etwaige Vorschädigungen in der Probe sein. Die Vorschädigung kann fertigungsbedingt eingebracht worden oder bei der Probenpräparation entstanden sein.

Die folgenden zwei Darstellungen Abbildung 4.4-11 und Abbildung 4.4-12 sollen abschließend einen Überblick über die ausgewählten Proben für die CT-Untersuchungen nach Belastung der taillierten Proben geben. Sowohl für die 4-Punkt-Biegeproben als auch für die Zugproben wurde der Bereich für die CT-Untersuchung markiert.

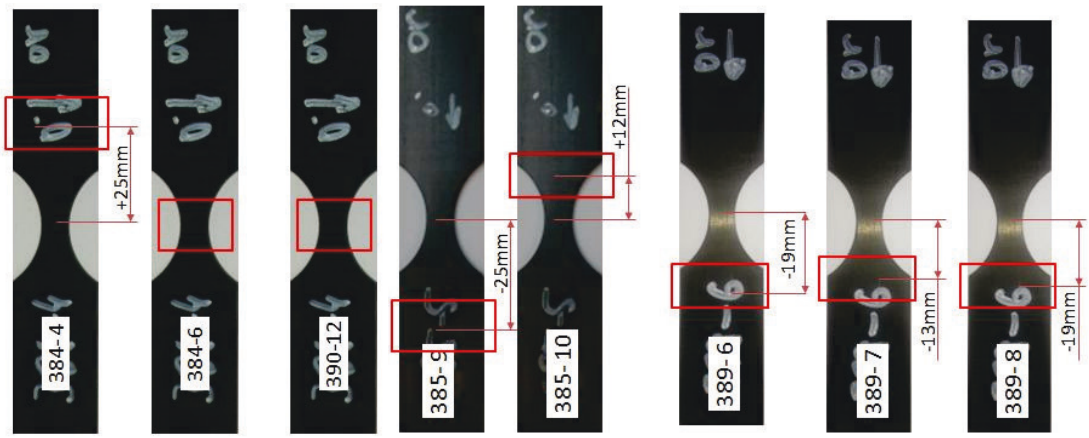


Abbildung 4.4-11 Biegeproben mit markiertem Bereich für CT-Untersuchungen

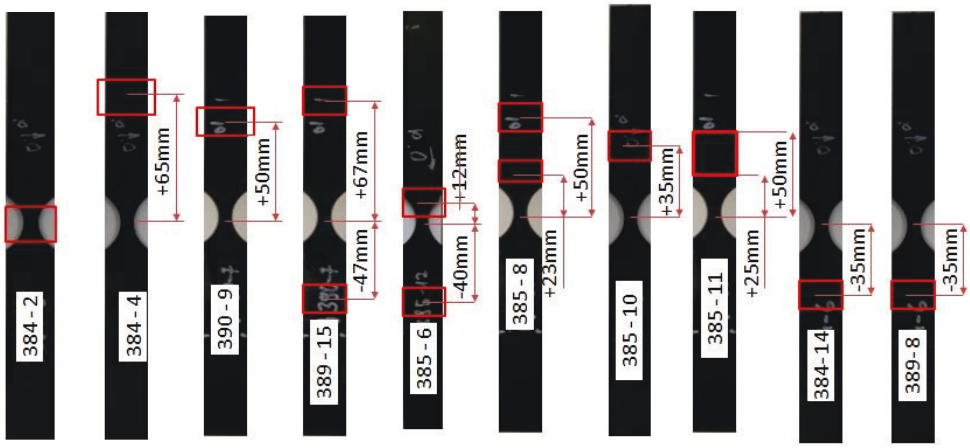


Abbildung 4.4-12 Zugproben mit markiertem Bereich für CT-Untersuchungen

Die verhältnismäßig hohe Anzahl von elektrischen Störungen bei den Schallemissionsmessungen, vor allem an Proben mit einem 90° Lagenaufbau, führt zu einer genaueren Betrachtung der Filterfunktionen und der Auswertprogramme in den jeweiligen Bearbeitungszeitpunkten der, bei der Messung ermittelten Schallemissionsrohdaten. Die wichtigste Größe der Filterfunktion bei den Schallemissionsmessungen an Zug- und 4-Punkt-Biegeproben an einer Universalprüfmaschine ist die probenspezifisch ermittelte Schallgeschwindigkeit in Kombination mit den Probenabmessungen und die daraus resultierende freie Probenlänge. Die als transientes Signal gewerteten Signale werden folglich hauptsächlich in Bezug auf deren Lokalisierung im Probenbereich gefiltert und sortieren die Signale aus, die nicht im Probenbereich liegen. Hier ist keine Ursache der Störsignale und nicht plausiblen Messdaten zu finden.

Die Filterung hinsichtlich der Zeitdifferenzen der an den Sensorpaaren ankommenden Signale und deren Burstlänge (Hits) gibt jedoch Aufschluss zu den elektrischen Störsignalen. Der Filteralgorithmus sortierte folglich Signale mit kurzer Burstlänge, die annähernd gleichzeitig von den Sensorpaaren erfasst wurden aus. Da der erwartete Hauptschädigungsbereich der taillierten Proben mittig ist und die Sensorpaare gleichweit von diesem Bereich entfernt sind, wurden einige Schallemissionssignale nicht als Event erkannt und aussortiert. Für das bessere Verständnis der spezifischen unterschiedlichen Burstlängen ist in Abbildung 4.4-13 ein getriggertes Event und ein getriggertes Störsignal abgebildet. Da Störsignale oft lediglich an einem Triggerkanal anliegen und dann nicht mehr über die Laufzeitdifferenz erkannt werden, ist es ebenfalls möglich, dass der Filteralgorithmus die Störsignale nicht einwandfrei erkannt hat und somit einige elektrische Störungen als Event gewertet wurden. Wie in Abbildung 4.4-13 auch zu sehen ist, wurde der Filter zur Unterscheidung der Burstlängen durch manche elektrischen Störungen außer Kraft gesetzt, da die Störungen pulsartig kurz nacheinander am Sensor ankamen.

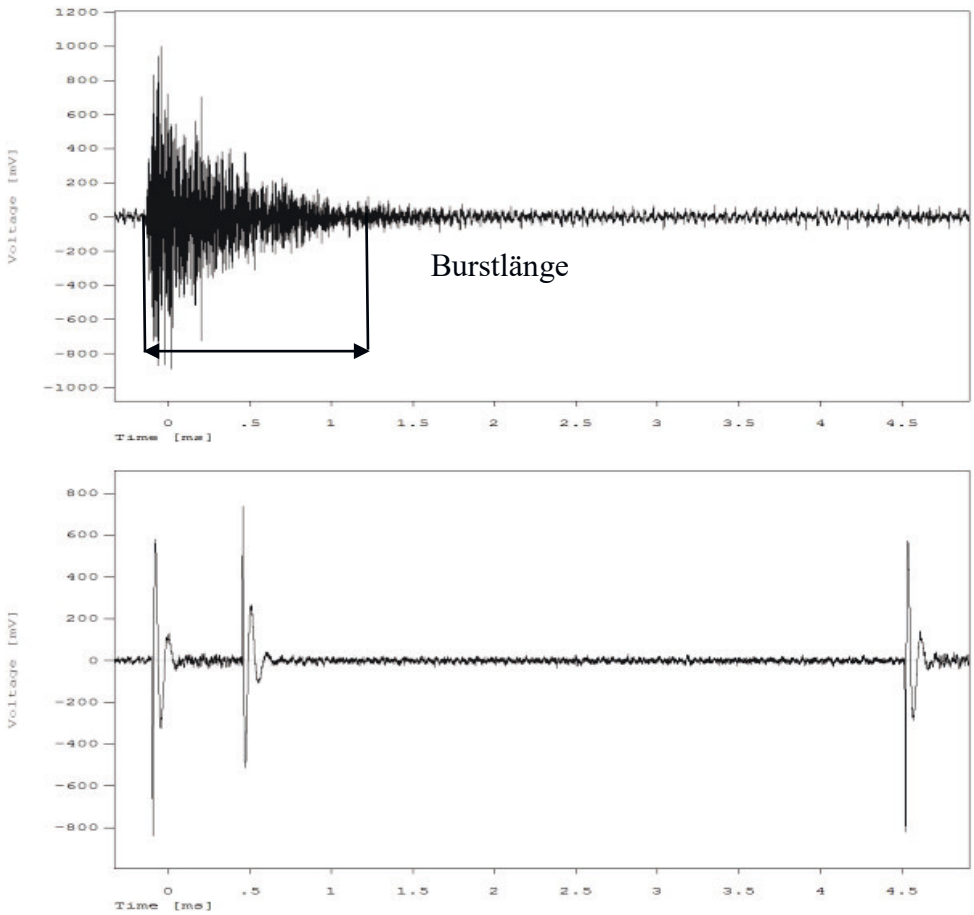


Abbildung 4.4-13 Burstlänge getriggertes Event (oben) / getriggertes Störsignal (unten)

Dies führte dazu, dass die schnell aufeinander ankommenden Signalspitzen als ein Signal mit der ungefähren charakteristischen Länge eines Bursts von einem Event eingestuft wurden. In dieser Konstellation (symmetrische Anordnung der Sensorpaare, mittig taillierte Probe) können, wie beispielsweise bei Zugprobe 385-1, in der Taillierung, „Scheinschallemissionen“ auftreten. Es ist folglich möglich, sogenannte Scheinschallemissionen zu messen, und es kann bei dieser Versuchskonfiguration auch zu einem Verlust realer Schallemissionssignale aus der geschädigten Probe kommen. Dies führt zu einer veränderten Versuchskonfiguration, die in einem nachfolgenden Kapitel näher erläutert wird.

Bei den CT-Untersuchungen wurden die Bereiche der ausgewählten Proben gemäß den Abbildung 4.4-11 und Abbildung 4.4-12 bei den Zug- und 4-Punkt-Biegeproben tomographiert. Die Voxelgröße wurde auf 12,5 festgelegt, was zu einer Auflösung von ca. 8 µm führte. In einigen Proben waren Einschlüsse zu finden. Diese sehr wahrscheinlich metallischen Einschlüsse erschwerten das Tomographieren, da Metalle einen deutlich höheren Röntgenkontrast aufweisen als Kunststoffe. Des Weiteren waren kleinere Fertigungsfehler wie Lufteinschlüsse zu sehen. Wie sich herausstellte, konnte nur bei einer Probe durch die CT-Untersuchungen ein exakter Schadensverlauf nachgewiesen werden. An Zugprobe 385-11 ist in Abbildung 4.4-14 ein längs verlaufender Riss zu erkennen, der allerdings bereits makroskopisch zu erkennen war. Daneben sind die metallischen (helle Punkte) Einschlüsse sichtbar. Der sich als ungünstig herausstellende Röntgenkontrast von Faser und Matrixmaterial in Kombination mit der potentiell zu geringen Vorschädigung in den taillierten Proben, führte bei dieser Versuchskonfiguration zu keinen weiteren verwertbaren CT-Aufnahmen.

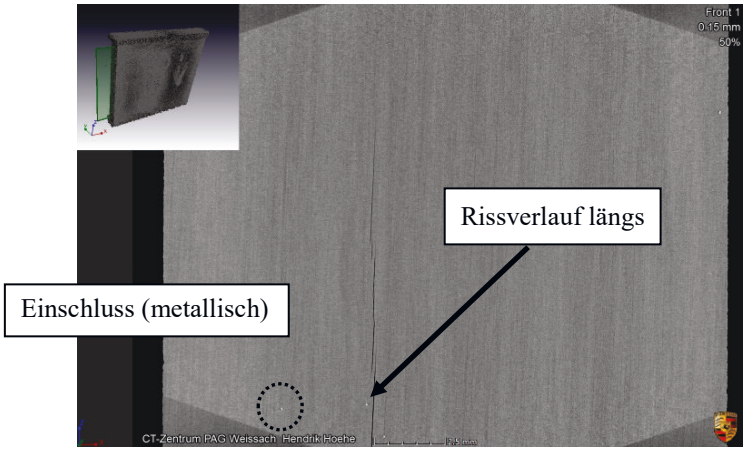


Abbildung 4.4-14 CT-Aufnahme Probe 385-11 mit makroskopisch sichtbarer Schädigung

Folglich konnte bei den geprüften taillierten Proben lediglich an der dargestellten Zugprobe 385-11 der Schädigungsgrad und das Schädigungsverhalten durch die Schallemissionsanalyse erfasst und mit der CT-Untersuchung validiert werden. Alle anderen geprüften taillierten Zug- und 4-Punkt-Biegeproben ließen keine Zuordnung von Schallemissionsparametern zu einem speziellen Schädigungsmechanismus zu. Die CT-Aufnahmen konnten zu wenig verwendbare Schäden in den Proben bildlich auflösen. Darüber hinaus lassen sich anhand der erzeugten Ergebnisse der Zugprobe 385-11 und den dazu gehörenden CT-Aufnahmen die verschiedenen Schallemissionsparameter nicht den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zuordnen. Die Schallemissionsanalyse liefert für Zugprobe 385-11 zwar plausible, für alle erfassten Events ähnliche Ergebnisse bezüglich des Bereiches der WPF. Allerdings ist der Abgleich über eine Probe statistisch betrachtet viel zu gering und es wurden bei dieser Probe auch nicht alle Bereiche der WPF angeregt, die eine allgemeingültige Zuordnung der WPF als Schallemissionsparameter zu den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zulässt (Abbildung 4.4-15). Ebenso fehlt der Abgleich mit Proben, die sich aus einem anderen Lagenaufbau zusammensetzen.

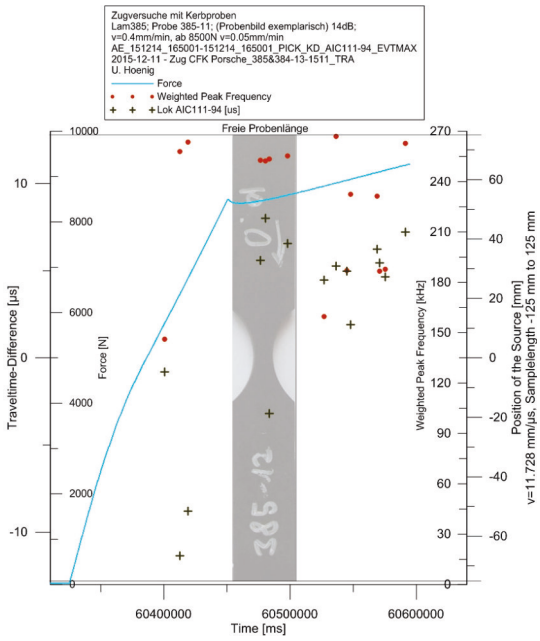


Abbildung 4.4-15 Schallemissionsverhalten von Probe 385-11 (mit exemplarisch überlagertem Probenbild von Probe 385-12

Die CT-Untersuchungen bestätigten jedoch endgültig die sehr hohe Lokalisierungsgenauigkeit der Schallemissionssignale. Es ist darüber hinaus unwahrscheinlich, dass die Proben zu gering geschädigt waren, da im Speziellen die Proben, die kurz unterhalb des Kraftniveaus belastet wurden bei dem die Referenzproben versagten, ausreichend vorgeschädigt sein müssen. So wäre zumindest ein punktuelles Versagen der Matrix im taillierten Bereich zu erwarten gewesen, da dort die höchsten Spannungen im Werkstoff bei Belastung auftreten. Ebenso gibt das Schallemissionsverhalten der Proben und die eindeutig bestimmten transienten Signale einen Hinweis auf real erfasste Events. Der Nachweis für die gute Lokalisierungsgenauigkeit der Schallemissionsereignisse durch Zugprobe 385-11 legt nahe, dass die Bereiche, die tomographiert wurden, auch dort sind, wo sich die schädigenden Ereignisse zugetragen haben. Eine zusätzliche Möglichkeit für die schlechte Qualität der CT-Aufnahmen kann eine zu geringe Auflösung sein.

4.5 Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse

Um das Schädigungsverhalten von FVK mit der Schallemissionsmessmethode detektieren zu können, wurde eine Versuchskonfiguration für begleitende Messungen bei Zugversuchen und 4-Punkt-Biegeversuchen entwickelt. Eine Grundvoraussetzung hierfür ist die hohe Genauigkeit der linearen Ortung der schädigenden und schallemittierenden Ereignisse. Die Darstellung der Schallemissionsereignisse in Clusterform erzeugte eine deutliche Trennung der Ereignisse bei der Darstellung mit der WPF. Vor allem im WPF-PP-Plot lassen sich der Theorie zufolge verschiedene Schädigungsmechanismen den unterschiedlichen Clustern zuordnen [12]. In Kombination mit der kumulierten Energie der Events lassen sich dann gewisse Zeitpunkte der schädigenden Ereignisse und deren Intensität an Proben ermitteln. Somit ist die prinzipielle Tauglichkeit des Versuchsaufbaus und der Versuchskonfiguration zum Hervorrufen und Identifizieren unterschiedlicher Schädigungsmechanismen erbracht. Es sind durch die Schädigungscluster sowohl Lagenaufbauten für Laminate die vorwiegend faserdominierte Schädigungsmechanismen hervorrufen, als auch Lagenaufbauten für Laminate mit hauptsächlich matrixdominierten Schädigungsmechanismen identifiziert worden. Das Felicity-Ratio liefert weiterhin Zusatzaussagen über die Schädigungsintensität, sofern die Belastungsregime zyklisch gewählt wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für weiterführende Untersuchungen zum Nachweis der Zuordnung von verschiedenen Schallemissionsparametern zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen Werkstoffkombinationen ausgewählt werden müssen, die einen ausreichend großen Röntgenkontrast aufweisen, sodass sich die Faserbündel deutlich von der Matrix in den CT-Aufnahmen abheben. Darüber hinaus sollen, wenn möglich, die nächsten CT-Aufnahmen mit einer höheren Auflösung erzeugt werden. Die Überprüfung von FVK-Proben unter Last mit der CT würde eine weitere Verbesserung mit sich bringen, da sich gewisse eingebrachte Schäden in FVKs nach der Entlastung wieder schließen und schwieriger zu detektieren sind. Zur Eliminierung der Störungen werden die Proben in Zukunft asymmetrisch tailliert sein und der PP1-WPF-Plot hat sich als vielversprechend für die Zuordnung von Schädigungsmechanismen zu Schallemissionsparameter herauskristallisiert. Im nächsten Kapitel werden die Ergebnisse von Vorversuchen an Zugproben mit verschiedenen Probenvariationen dargelegt. Dies soll die Probendefinition für die Proben, die im In-Situ-CT geprüft werden, erleichtern und etwaige, bisher noch unbekannte, Einflüsse auf die Schallemissionscharakteristika auf Probenebene beleuchten. Es werden hierfür lediglich

Zugprüfungen durchgeführt, da im In-Situ-CT bauraumbedingt mit der Schallemissionsmesstechnik ausschließlich Zugversuche durchgeführt werden können.

4.6 Ergebnisse weitere Vorversuche mit Geometrievarianz

Der Versuchsaufbau für die Zugprüfungen, die mit Schallemissionsmessungen unterstützt werden, bleibt derselbe wie bei den symmetrisch taillierten Zugproben.

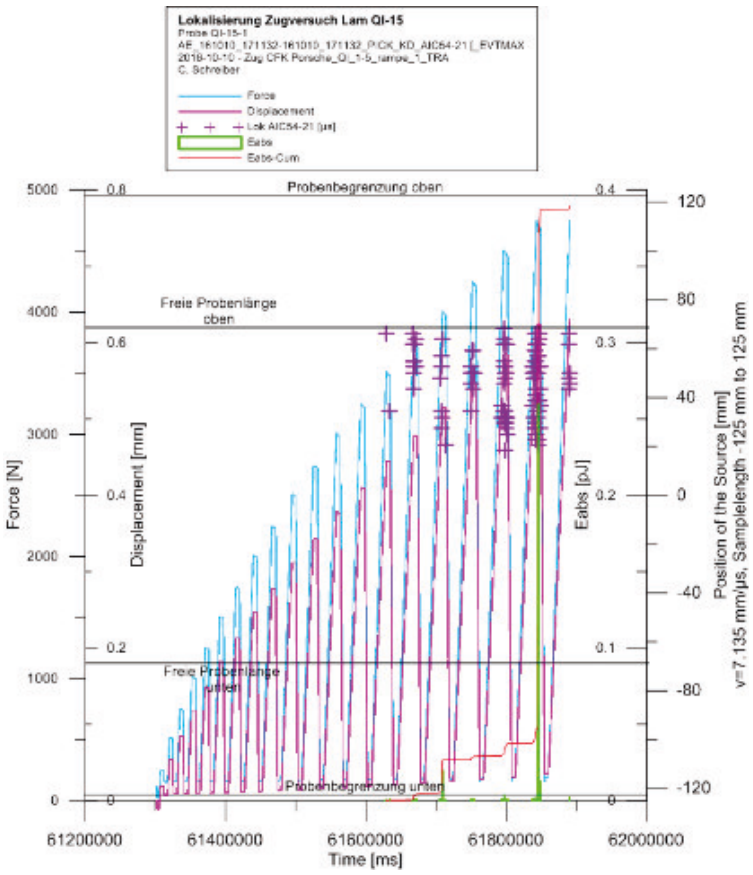


Abbildung 4.6-1 lineare Lokalisierung von asymmetrisch taillierten Proben

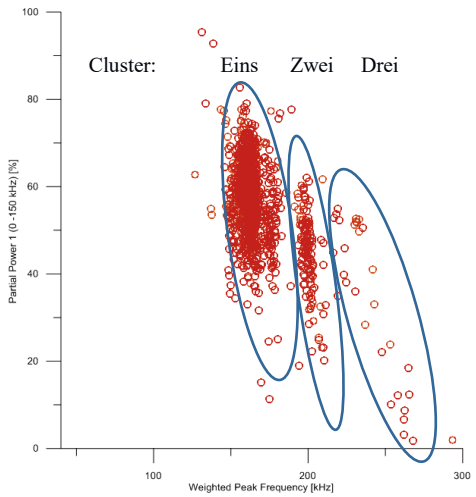
Eingangs kann festgestellt werden, dass die asymmetrische Taillierung der Proben das Problem mit den EMV-Störungen löste, da, wie die dargestellte Abbildung 4.6-1 zeigt, Schallemissionssignale aus dem taillierten Bereich jetzt zu unterschiedlichen Zeitpunkten von den Sensorpaaren erfasst werden. Die Schallemissionssignale konnten wie erwartet im taillierten Bereich lokalisiert werden. Für die Darstellung der Schallemissionsergebnisse wird aufgrund der Zuordnung zu den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen ausschließlich die Darstellungsvariante mit der gewichteten Vorzugsfrequenz (WPF in kHz) über der partiellen Leistung 1 (PP1 in %) gewählt. Die einzelnen Schallemissionsereignisse sind als rote Kreise dargestellt. Der Lagenaufbau wurde bei jeder Versuchsreihe standardmäßig in 0/90°, ±45° und quasiisotrop ausgeführt. Geprüft wurde mit einem je nach Lagenaufbau angepassten zyklischen Prüfregime, bei dem jedes Mal eine nach Erreichen der Lastrampe wieder auf eine definierte Vorspannkraft entlastet wurde. Die Proben waren immer aus derselben Materialkombination. Zur Erreichung einer statistisch relevanten Ergebnissicherheit wurden für jeden Einzelversuch fünf gültige Proben ausgewertet. Dabei wurde die Probengeometrie, wie nachfolgend beschrieben, variiert und der Einfluss auf die SE-Cluster betrachtet:

- Varianz der Probenbreite bei taillierten Proben
- Varianz der Lagenanzahl bei taillierten Proben
- Varianz der Probengeometrie (tailliert / nicht taillierte Proben)

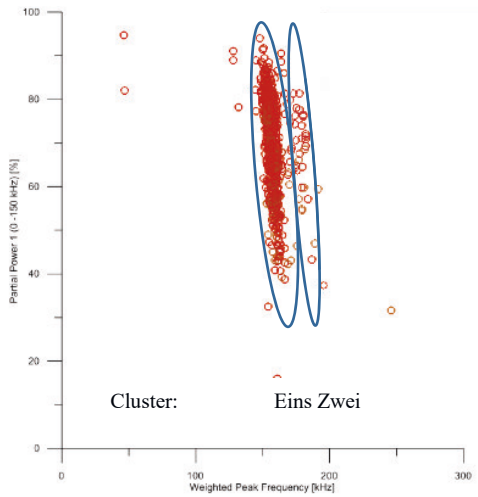
4.6.1 Varianz der Probenbreite bei taillierten Proben

Bei den Versuchen an 0/90° Proben ist zu erkennen, dass sich bei den schmaleren taillierten Proben die Schallemissionssignale mit einer höheren Anzahl detektieren lassen (Abbildung 4.6-2a). Es bilden sich drei Cluster aus, wobei das dritte Cluster bei den schmalen Proben nicht stark ausgeprägt ist. In Abbildung 4.6-2b hat sich kein drittes Cluster ausgebildet und somit fehlt in dieser Prüfkonfiguration das Cluster mit hoher WPF, welches den faserdominierten Schadensmechanismen zugeordnet wird. Cluster eins und zwei sind hingegen gut voneinander getrennt erkennbar und in einem ähnlichen Bereich für die PP1 und der WPF vergleichbar zu Abbildung 4.6-2a. Eine mögliche Erklärung hierzu kann das bessere Verhältnis der Taillierung zur Gesamtbreite sein. Potentielle Dämpfungseffekte der Materialkombination könnten bei den schmalen Proben weniger zum Tragen kommen. Bei einem ±45° Lagenaufbau ist kaum ein Unterschied zu erkennen. So bilden sich in Abbildung 4.6-2c und Abbildung 4.6-2d das erste Cluster (matrixdominierte Schäden) im selben Bereich für die PP1 und der WPF aus. Cluster zwei, was für kombinierte Faser-und Matrixschäden steht, ist hingegen schwach ausgeprägt und Cluster drei zeigt bei beiden Varianten ab einer WPF von ca. 220 kHz die faserdominierten Schädigungsmechanismen. Beim quasiisotropen Lagenaufbau, dargestellt in Abbildung 4.6-2e und Abbildung 4.6-2f, werden die Cluster in allen Bereichen in der schmalen Probe deutlicher ausgebildet. Bei den breiten Proben verschwimmen Cluster eins und zwei und das dritte ist kaum zu erkennen. Das dritte Cluster bei den breiten Proben könnte tendenziell mit einer deutlich größeren Anzahl an Proben erzeugt werden. Das kaum vorhandene dritte Cluster in Abbildung 4.6-2f, könnte ähnlich wie in Abbildung 4.6-2b, mit dem schlechteren Verhältnis von Taillierung zu Gesamtbreite der Probe begründet sein. Die ersten zwei Cluster befinden sich jedoch bei den schmalen und breiten Proben in einem ähnlichen Bereich was die WPF und die PP1 angeht.

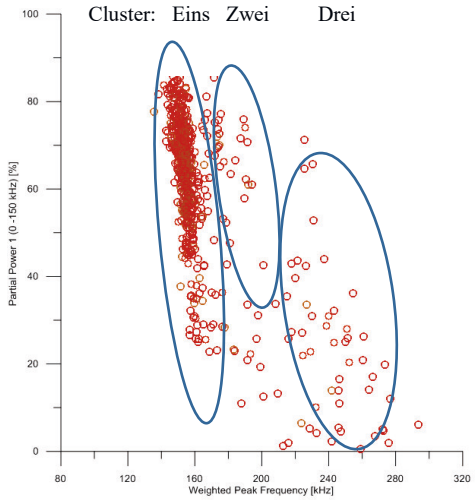
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die schmalen Proben eine bessere Clusterauflösung liefern (besseres Verhältnis Kerbe zu Gesamtbreite der Probe). Die Proben mit einem ±45° Lagenaufbau und die quasiisotropen Proben liegen im gleichen gemittelten WPF-Bereich- und PP1-Bereich [48]. Die beste Clustertrennung war bei den schmalen, quasiisotropen Proben möglich.



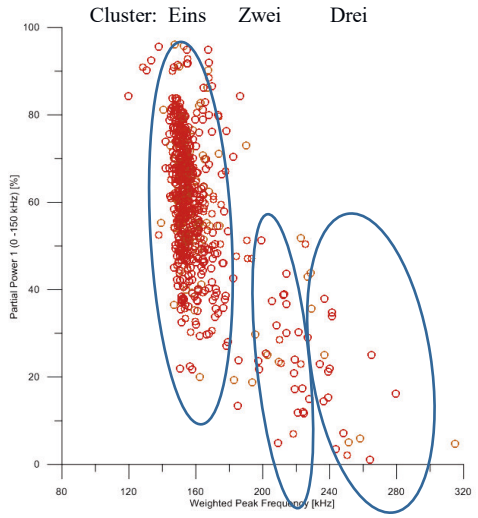
a: WPF-Cluster für 0/90°, 4 Lagen, Probenbreite 15mm, tailliert



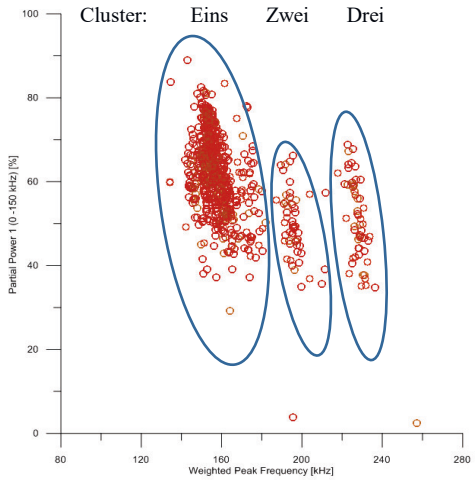
b: WPF-Cluster für 0/90°, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



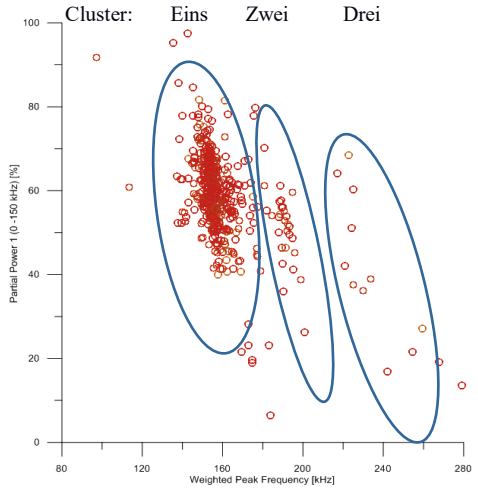
c: WPF-Cluster für ±45°, 4 Lagen, Probenbreite 15mm, tailliert



d: WPF-Cluster für ±45°, 4 Lagen, Probenbreite25mm, tailliert



e: WPF-Cluster für quasiisotropen Lagenaufbau, 4 Lagen, Probenbreite 15mm, tailliert

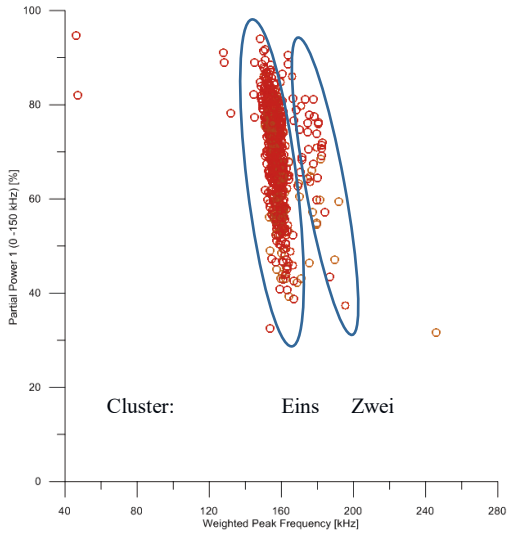


f: WPF-Cluster für quasiisotropen Lagenaufbau, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

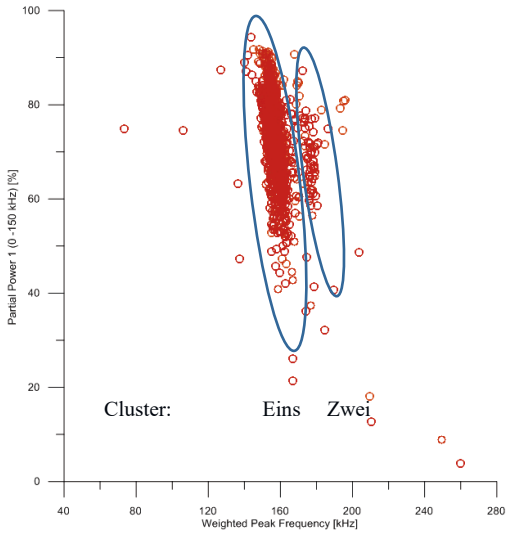
Abbildung 4.6-2 AE-Ergebnisse bei Varianz der Probenbreite (taillierten Proben)

4.6.2 Varianz der Probendicke durch Vergleich von 4-lagigen zu 6-lagigen Laminataufbauten

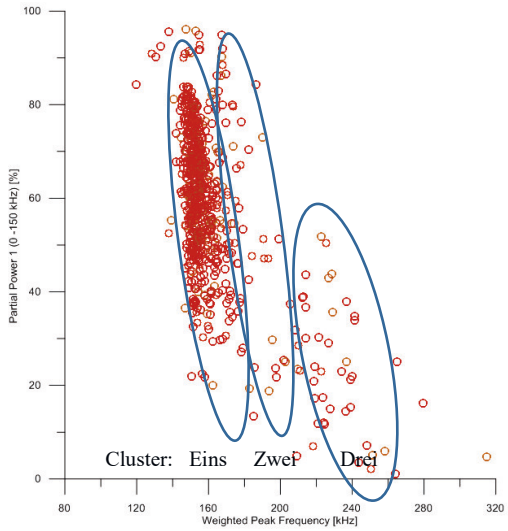
Fast analog zu den Ergebnissen der Untersuchungsreihe mit unterschiedlichen Probenbreiten werden für die 0/90° Proben mit unterschiedlichen Laminatstärken (Varianz der Lagenanzahl) die ersten zwei Cluster gut ausgebildet (Abbildung 4.6-3a und Abbildung 4.6-3b). Die dickeren Proben weisen dabei erwartungsgemäß mehr Schallemissionsaktivitäten auf und bei beiden Laminaten wird das dritte Cluster nicht nennenswert ausgebildet. Dies ist zumindest für die 0/90° Proben abschließend noch nicht ganz schlüssig, da faserdominierte Schädigungsmechanismen erwartet wurden. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich im zweiten Cluster für diesen Lagenaufbau bereits Faserbrüche befinden und das Cluster zwei und drei somit ein „verschwommenes Mischcluster“ ist. Bei den ±45° Proben, dargestellt in Abbildung 4.6-3c und Abbildung 4.6-3d, ist die Übereinstimmung der Schallemissionsergebnisse gleichermaßen gegeben. Im Vergleich zu den 0/90° Proben war hier die Schallemissionsaktivität bei den dünneren Proben höher, was zu einer deutlicheren Clusterausbildung führte. Die quasiisotropen Proben in Abbildung 4.6-3e und Abbildung 4.6-3f zeigen bei der Varianz der Probendicke gleichermaßen eine gute Übereinstimmung der Schallemissionsaktivität- und Ergebnisse. Ähnlich zu den Ergebnissen der ±45° Proben zeigen die dünneren Proben eine geringfügig bessere Ausprägung der Cluster, was mit einer etwas höheren Anzahl der Schallemissionsereignisse je Cluster begründet werden kann. Was die PP1 betrifft, weisen die Schallemissionsergebnisse der quasiisotropen Proben die niedrigsten Werte auf. Trotz einer ähnlichen Bereichsausbildung der unterschiedlichen Cluster, sehen die grafisch dargestellten Schallemissionsergebnisse im WPF-PP-Plot je nach Lagenaufbau sehr unterschiedlich aus. Hier lassen sich erstmals Schallemissionscharakteristika je nach Lagenaufbau erkennen.



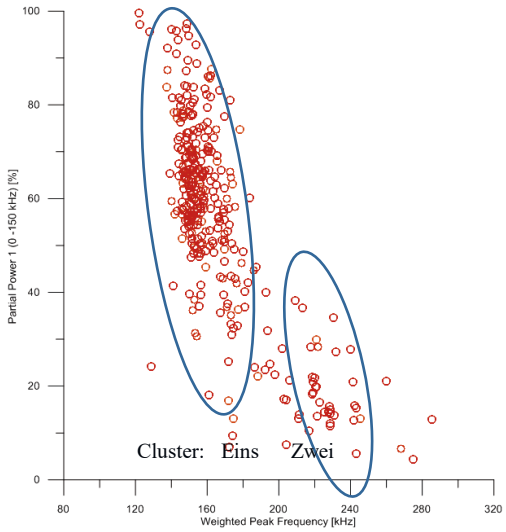
a: WPF-Cluster für 0/90°, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



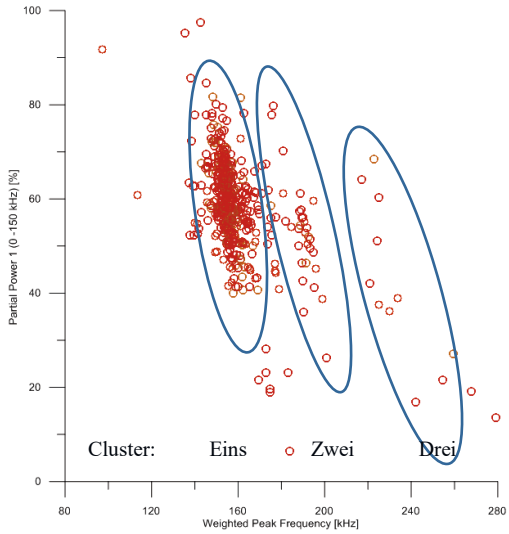
b: WPF-Cluster für 0/90°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



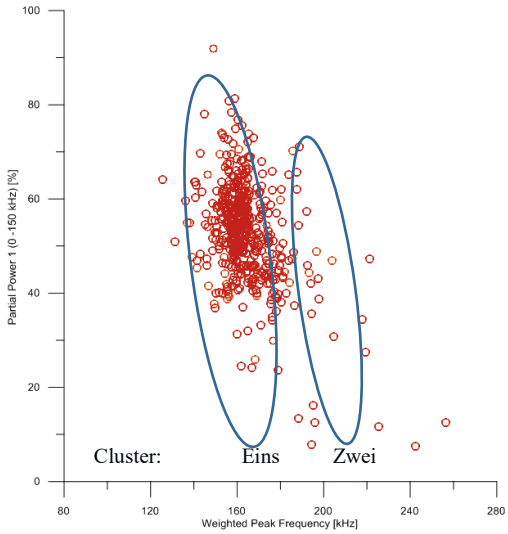
c: WPF-Cluster für ±45°, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



d: WPF-Cluster für ±45°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



e: WPF-Cluster für quasiisotropen Lagenaufbau, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



f: WPF-Cluster für quasiisotropen Lagenaufbau, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

Abbildung 4.6-3 AE-Ergebnisse bei Varianz der Probendicke durch Vergleich von 4lagigen zu 6lagigen Laminataufbauten

Abschließend kann gesagt werden, dass die Schallemissionsereignisaktivität bezüglich der Darstellung WPF über PP1 von der Lagenanzahl der Laminate unabhängig ist [48]. Es bilden sich bei beiden Dickenvarianten je nach Lagenaufbau dieselben Cluster aus. Teilweise ist eine bessere Clusterausbildung bei den dünneren Proben zu erkennen. Ein Grund hierfür kann die Überlagerung der Schallemissionsereignisse bei dicken Proben sein.

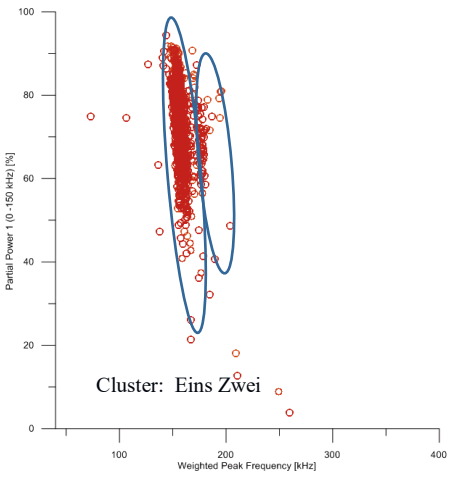
4.6.3 Varianz der Probengeometrie

Um den geometrischen Einfluss auf die Schallemissionsmessung zu erarbeiten, wurden in der letzten Versuchsreihe die Ergebnisse der Schallemissionsmessung an Zugproben mit einer Breite von 25mm sechslagig, tailliert und nicht tailliert mit den bereits vorgestellten drei verschiedenen Lagenaufbauten diskutiert. In Abbildung 4.6-4a und Abbildung 4.6-4b ist ein deutlicher Unterschied bei der Clusterausbreitung der 0/90° Proben zu erkennen. Bei den

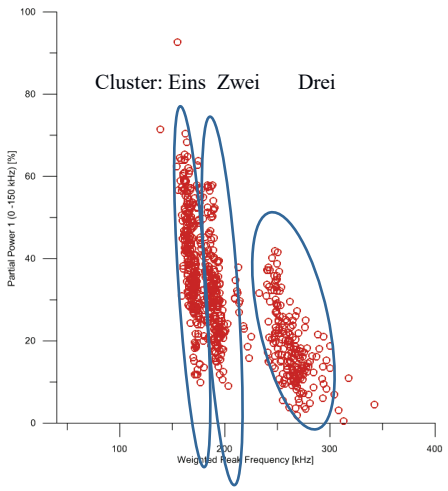
taillierten Proben werden zum wiederholten Male lediglich zwei Cluster gebildet. Da die taillierten Proben für diese Versuchsreihe dieselbe Probenspezifikation wie bei den Ergebnissen in Abbildung 4.6-3b haben und sich die Ergebnisse decken, ist die Reproduzierbarkeit des Versuchskonzeptes bei dieser Art von Proben erbracht. Die Schallemissionsergebnisse der nicht taillierten Proben hingegen weisen gut getrennte drei Einzelcluster auf. Das gemittelte Niveau der WPF ist bei den nicht taillierten Proben höher, wohingegen das gemittelte Niveau der PP1 bei den taillierten Proben höher ist als bei den nicht taillierten Proben. Dies kann auf die erzeugten größeren Zugspannungen bei den nicht taillierten Proben zurück zu führen sein. Zusätzlich ist die durch die Geometrie (Taillierung) beeinflusste Dämpfung der Schallsignale im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abbildung 4.6-3b und Abbildung 4.6-4a geringer.

Bei den Proben mit einem ±45° Lagenaufbau gibt es bezüglich der Clusterausbildung keine elementaren Unterschiede. Wie in Abbildung 4.6-4c und Abbildung 4.6-4d dargestellt ist, lässt sich jeweils das dritte Cluster gut von den beiden ersten Clustern separieren. Jedoch sind die ersten beiden Cluster schwer zu unterscheiden. Wie bereits bei den Ergebnissen der 0/90° Proben bekannt, emittieren die nicht taillierten Proben mehr Schallsignale und das dritte Cluster bildet sich deutlicher aus (Abbildung 4.6-4d). Auffällig ist auch die Häufung der Schallemissionen im oberen Bereich der PP1. Ein Grund kann speziell bei den Proben mit einem ±45° Lagenaufbau sein, das zu diesem Zeitpunkt die Proben delaminieren. Abbildung 4.6-4e zeigt für einen quasiisotropen, taillierten Lagenaufbau keine deutliche Clusterausprägung vergleichbar zur Abbildung 4.6-3e, die zwei Lagen weniger aufweist. Alle drei gut getrennten Cluster weisen die Schallemissionsergebnisse der nicht taillierten Proben mit demselben Aufbau in Abbildung 4.6-3f auf. Auch hier ist das Niveau der PP1, analog zu den zuvor dargestellten Versuchsergebnissen, für die taillierten und nicht taillierten Proben niedriger als bei den 0/90° und ±45° Lagenaufbauten [48].

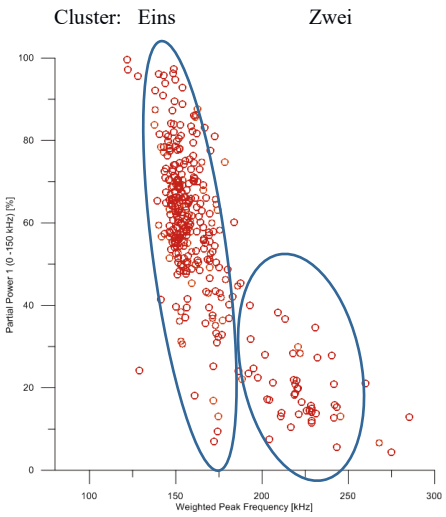
Vergleicht man die Ergebnisse der Schallemissionsmessung an taillierten und nicht taillierten Zugproben wird deutlich, dass sich bei den nicht taillierten Zugproben die Schallemissionscluster im WPF-PP-Plot besser und genauer bilden. Dies liegt an der größeren Anzahl von Schallemissionsereignissen, hängt jedoch unmittelbar mit einer großflächigen Verteilung der Schallemissionsereignisse auf der gesamten Probenlänge zusammen. Die Versuchsergebnisse der ±45° Proben und der 0/90° Proben sind vergleichbar. Im oberen Bereich der PP1 gibt es bei den ±45° Proben jedoch eine Häufung der Ereignisse. Diese können, wie bereits diskutiert, Indizien für Delaminationen sein. Des Weiteren stellten sich bei den ±45° Proben zusätzlich Schallemissionsereignisse in einem höheren Bereich der WPF ein, die tendenziell auf faserdominierte Schädigungsmechanismen hinweisen. In diesem Fall, können die hochfrequenten Anteile auf ein Faser-Matrix-Mischversagen wie z.B. Faserauszug hindeuten.



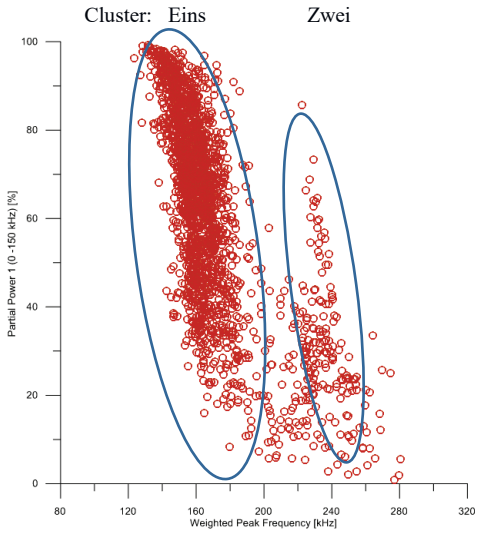
a: WPF-Cluster für 0/90°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



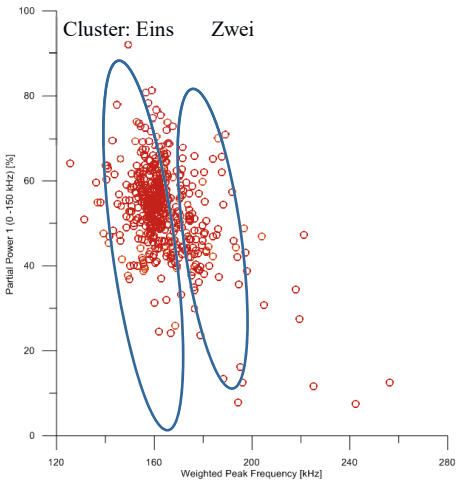
b: WPF-Cluster für 0/90°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, nicht-tailliert



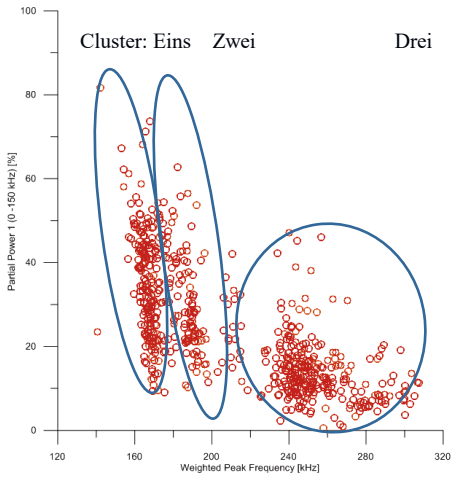
c: WPF-Cluster für ±45°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



d: WPF-Cluster für ±45°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, nicht-tailliert



e: WPF-Cluster für quasiisotropen Lagenaufbau, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



f: WPF-Cluster für quasiisotropen Lagenaufbau, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, nicht-tailliert

Abbildung 4.6-4 AE-Ergebnisse bei Varianz der Varianz der Probengeometrie

Auch bei den asymmetrisch taillierten Zugproben zeigen die Messergebnisse eine starke Häufung der Schallemissionsaktivität in eben diesem Bereich. Dies ist für weiterführende, nicht zerstörende Tests ein wichtiger Hinweis, um etwaige zusätzliche Untersuchungen zur Identifikation bestimmter Vorschädigungsmechanismen mit einem In-Situ-CT durchzuführen. Diese Versuchsreihe zeigt deutlich, dass für die Anregung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen sowohl der Lagenaufbau, die Probenbreite als auch die Taillierung der Proben für die zyklischen Zugversuche Einfluss auf die Ausbildung der Schallemissionsantwort der Laminate unter Last haben. Zusätzlich zu den unidirektionalen Proben, die je nach Prüfrichtung zur Faserorientierung sowohl getrennt matrixdominierte Schädigungsmechanismen und faserdominierte Schädigungsmechanismen zeigen, eignen sich beispielsweise asymmetrisch taillierte, schmale Proben mit einem dünnen 0/90° Lagenaufbau für die Detektion von matrixdominierten Versagensmechanismen. Speziell mit einem zyklischen Prüfregime lassen sich die Rissöffnung und das Risswachstum gut erfassen.

Die deutlichste Clustertrennung stellte sich bei einer Probenkonfiguration von 4 Lagen (dünne Probe) schmal mit Taillierung ein. In diesem Fall wurden durch das gewählte Prüfregime alle Schädigungsmechanismen, denen eine gewichtete Vorzugsfrequenz zuzuordnen ist, erfasst. Mehrlagige Lagenaufbauten mit einer ±45° Faserorientierung erzwingen gemäß dieser Versuchsreihe Delaminationen. Die Ausprägung der Cluster war bei den nicht taillierten Proben besser als bei den taillierten.

Für nachfolgende Versuchsreihen in einem In-Situ-CT sind allerdings taillierte Proben favorisiert, da durch die Taillierung der Röntgendetektor näher an den Prüfling fahren kann und somit eine bessere Auflösung erreicht wird. Dasselbe gilt für Zugproben mit einem quasiisotropen nicht taillierten Lagenaufbau, bei dem sich das Cluster der faserdominierten Schädigungsmechanismen mit der für dieses Cluster charakteristischen hohen WPF als eigenes Cluster sehr gut ausbildet. Betont werden muss, dass unabhängig von der gewählten Probenspezifikation sich die unterschiedlichen Schallemissionscluster immer im selben Bereich des WPF-PP-Plots ausbilden. Dies und die reproduzierbaren Ergebnisse bei einem wiederholten Versuch mit derselben Probenspezifikation ist als eine Verifizierung der angewandten Messtechnik und der verwendeten Auswertealgorithmen für Schallemissionsprüfungen an Proben aus FVKs zu werten.

4.7 Zuordnung unterschiedlicher Schädigungsmechanismen mittels Computertomographie

Die Probengeometrie für die in-situ-Versuche mit einer CT-Messanlage wurde anhand den Erkenntnissen der Vorversuche wie folgt festgelegt:

- Proben sind mit einer Taillierung versehen, um das Versagen auf einen kleinstmöglichen Bereich begrenzen zu können.
- Probenabmaße sind 250mm x 15mm, da sich die Schallemissionscluster besser abgrenzen.
- Vierlagige Proben, sodass keine Überlagerung mehrerer Cluster entsteht. Die geringere Lagenanzahl (vier Lagen) wirkt sich zusätzlich positiv auf die CT-Ergebnisse aus.

Zusätzlich zur geometrischen Bestimmung der Proben mussten die ausgewählten Proben für die in-situ Tests die Anforderungen hinsichtlich eines ausreichend großen Röntgenkontrasts zwischen der Faser und der Matrix erfüllen. Die Eignung der Computertomographie beruht auf

unterschiedlich großen Absorbtionskoeffizienten der einzelnen Komponenten in einem Werkstoffverbund. Das heißt, die Faser und die Matrix im ausgewählten Werkstoff müssen einen dementsprechend großen Dichteunterschied aufweisen. In den folgenden Abbildungen soll exemplarisch verdeutlicht werden, wie unterschiedlich die Qualität von CT-Untersuchungen an FVKs sein kann. Abbildung 4.7-1 zeigt eine Probeaufnahme eines Werkstoffes, der keinen ausreichenden Röntgenkontrast aufweist. Es ist zwar eine ±45° Faserorientierung zu erkennen, allerdings ist eine Detektion verschiedener Schädigungsmechanismen durch die CT-Untersuchung nicht möglich.

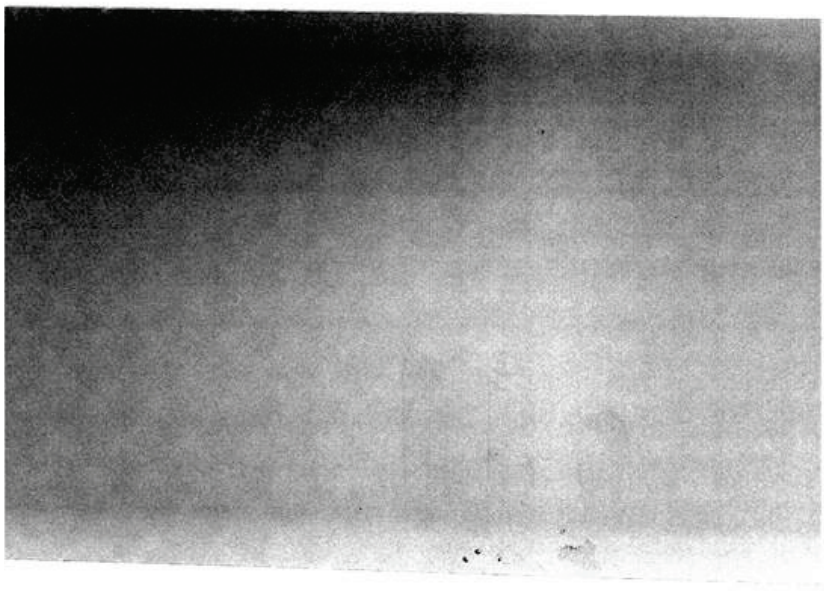


Abbildung 4.7-1 CT-Aufnahme einer nicht geeigneten Materialkombination; Dichteunterschied zu gering

Ein anderes Bild bietet die Darstellung in Abbildung 4.7-2. Das Ergebnis der CT-Untersuchung zeigt eindeutig, dass sich diese spezielle Faser-Matrix-Kombination sehr gut für Untersuchungen durch einen Computertomographen eignet. Allgemein ist zu beachten, dass ein schmaler Bildbereich die Auflösung der CT-Aufnahme verbessert. Ebenso hilfreich ist es, die Proben möglichst dünn zu gestalten, da die Dämpfung der Röntgenstrahlen durch die einzelnen Lagen bei steigender Lagenanzahl ebenfalls ansteigt.

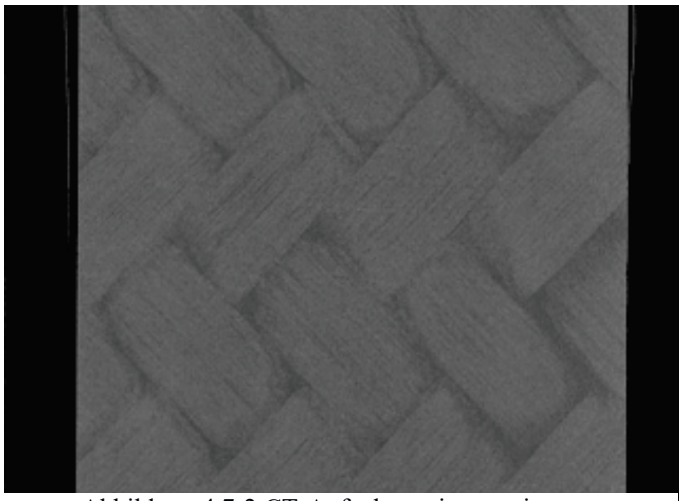


Abbildung 4.7-2 CT-Aufnahme einer geeigneten Materialkombination; Dichteunterschied ausreichend groß

Nach erfolgtem Nachweis der CT-Tauglichkeit dieses Werkstoffes wurden gemäß der Erkenntnisse und den allgemeinen Restriktionen zur CT-Tauglichkeit drei vierlagige Platten mit den Lagenaufbauten 0/90°, ±45° und QI hergestellt. Um den Messbereich einzugrenzen und den Hauptschädigungsbereich unter Zugbelastung einzugrenzen, wurden die Proben asymmetrisch tailliert präpariert. Die Taillierung reduziert die Probenbreite auf 6mm.

Die in-situ-Prüfmaschine unterscheidet sich im Vergleich zur Universalprüfmaschine der PAG, auf der die Vorversuche durchgeführt wurden, hauptsächlich im Bereich der Probeneinspannung. Um die Vergleichbarkeit der beiden Untersuchungen hinsichtlich der Erfassungsqualität der Schallemissionssignale gewährleisten zu können, wurden neue Sensorjochs gefertigt, die die Applikation an den Spannbacken der in-situ-Messmaschine ähnlich zu den Gegebenheiten bei der Universalprüfmaschine von den Voruntersuchungen ermöglichten (Abbildung 4.7-3).

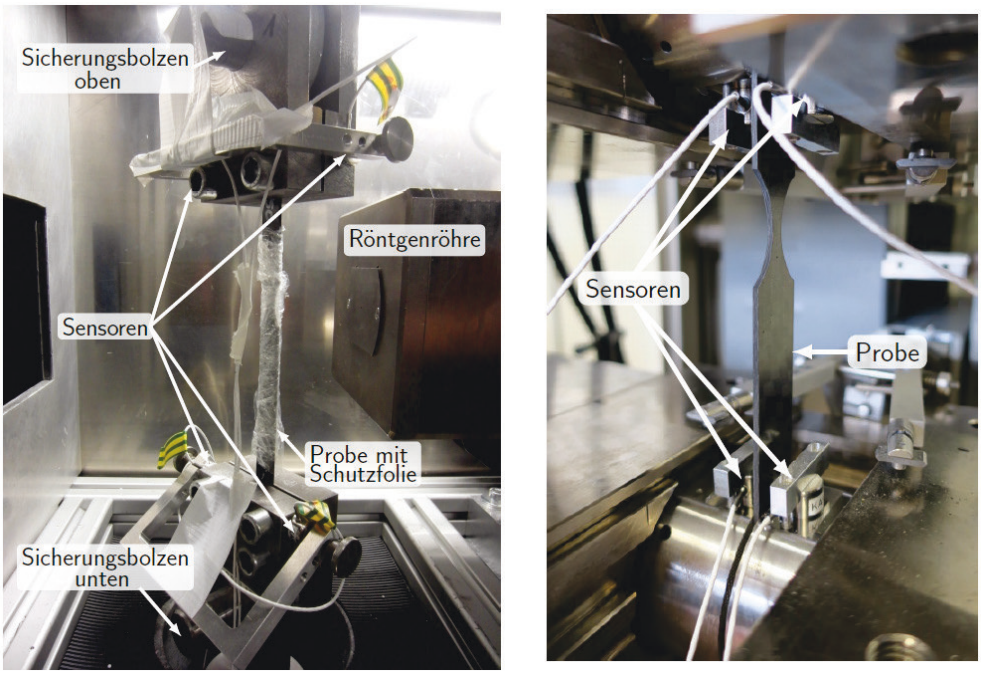


Abbildung 4.7-3 Vergleichende Darstellung der Probeneinspannung inklusive Sensorapplikation; links in-situ Prüfmaschine (ILK Dresden), rechts Universalprüfmaschine (EZW)

Wie aus der vergleichenden Darstellung der Probeneinspannung hervorgeht, ergeben sich trotzdem bauraumbedingt Unterschiede in der richtungsabhängigen Positionierung der Sensoren zur Probe. Die Sensoren der in-situ-Messmaschine waren an der Längsseite der mechanischen Spannbacken angebracht, wohingegen die Sensoren auf den hydraulischen Spannbacken der Universalprüfmaschine der PAG in der Nähe der Probenfront appliziert waren. Deshalb war der Abstand der Sensoren bei der in-situ-Messmaschine zur Probe größer, was einen höheren Dämpfungseffekt der Schallemissionssignale nach sich zog. Des Weiteren mussten die Kabel der Sensoren so angebracht werden, dass im Bereich des Röntgenstrahls keine Störungen zu erwarten waren. Um die Röntgenröhre vor umherfliegenden Bruchstücken der Proben zu schützen, wurden die eingespannten Proben mit Klarsichtfolie umwickelt, die keine beeinträchtigende Wirkung auf die Ausbreitung der elastischen Wellen hatte. Allerdings konnte man die Folie auf den CT-Bildern erkennen. Dieser Umstand und die daraus entstandenen Unschärfen und Artefakte zogen eine aufwändige Nachbearbeitung der CT-Aufnahmen nach sich.

4.7.1 In-situ Messung Schallemission und CT

Die Proben für die in-situ-Untersuchungen wurden aus denselben Platten gewonnen wie die der Voruntersuchungen (Proben aus Kapitel 4.6) und folglich konnte die ermittelte, zyklische Prüfkonfiguration übernommen werden. Gemäß den jeweiligen Lagenaufbauten der Proben wurden diese mit 0/90-15-(6-10), ±45-15-(6-10) und QI-15-(6-10) bezeichnet. Die Prüfkonfiguration musste lediglich hinsichtlich der Zeitdauer einer CT-Messung angepasst werden. Wie bereits aus den Voruntersuchungen hervorging, wurde nicht bei jeder Lastrampe Schallemission gemessen. Vor allem bei den niedrigen Lastrampen wurden deshalb keine CT-Messungen durchgeführt. Der Hauptfokus lag bei den Lastrampen die ein hohes Aufkommen an Schallemissionen zeigten, sodass ab dieser Lastrampe bis hin zum Versagen der Probe die CT-Messungen durchgeführt wurden. Vor Beginn der eigentlichen CT-Messung mussten die Proben „entspannt“ werden, um kleinste Relativbewegungen oder Setzverhalten im Werkstoff während der CT-Messung, die einen negativen Einfluss auf die Aufnahmequalität haben könnten, zu vermeiden. Es wurde deshalb die jeweilige Maximalzugkraft um 200 N gesenkt und die Probe wurde zwei Minuten in diesem Zustand gehalten. Danach erfolgte die CT-Messung. In Abbildung 4.7-4 ist schematisch der Kraft-Zeit-Verlauf der Prüfmaschine und die Schallemissionsaktivität der Probe 0/90-15-6 bei den jeweiligen Laststufen zu sehen. Daraus geht hervor, wann nach einer erhöhten Schallemissionsaktivität im Werkstoff unter Last die CT-Messungen durchgeführt wurden.

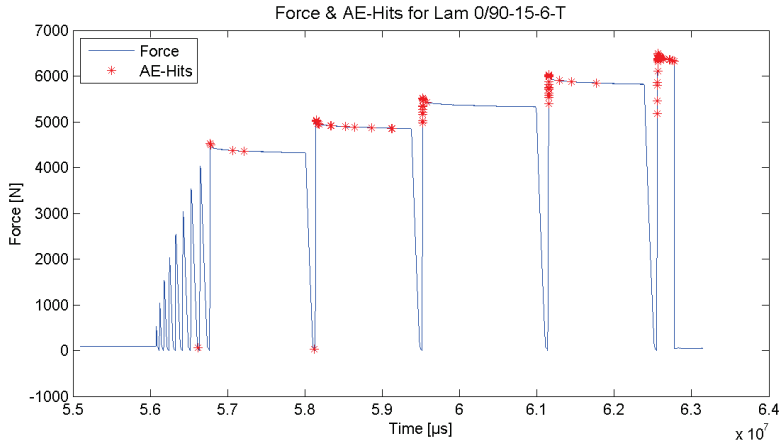


Abbildung 4.7-4 Kraftverlauf für die Probe 0/90-15-6, mit 0/90◦-Lagenaufbau, sowie die aufgetretenen Schallemissionen, gut erkennbare Haltebereiche für die CT-Aufnahmen

Die CT-Messung erfolgte demnach während den Plateau-ähnlichen Haltevorgängen in der Kraftkurve. Zu Beginn jeder Untersuchung wurde jede Probe in einem leicht vorgespannten Zustand (100 N Zugkraft) tomographiert, um den Ausgangszustand und etwaige fertigungsbedingte Fehlstellen zu erfassen. Trotz der entspannenden Haltezeit von zwei Minuten und einer Zugkraftreduktion von 200 N vor jeder CT-Messung, wurde ein deutlicher Kraftabfall während der CT-Messung erfasst. Es liegt nahe, dass sich der Werkstoff bei den Haltevorgängen der Probe während den CT-Messungen weiter schädigt. Diese These wird durch erfasste Schallemissionssignale während dieser Haltezeiten gestützt. Bewiesen werden kann diese Annahme durch das Versagen der Probe 0/90-15-6 nach einer Maximalbelastung von 6000 N in der darauf folgenden Haltephase für die CT-Messung (Abbildung 4.7-4).

Die Tauglichkeit der bei den Vorversuchen definierten Versuchskonfiguration hinsichtlich der Clusterausbildung der Schallemissionssignale beim in-situ-Versuchsaufbau konnte ebenfalls anhand der Probe 0/90-15-6 untersucht werden. In Abbildung 4.7-5 ist trotz geringer Menge der Schallemissionsmesspunkte bereits eine Clusterausbildung zu erkennen, die jedoch nicht mit der Versuchsreihe 0/90-15-(1-5) aus den Vorversuchen (siehe Kapitel 4.6) an der Universalprüfmaschine der PAG zu vergleichen sind.

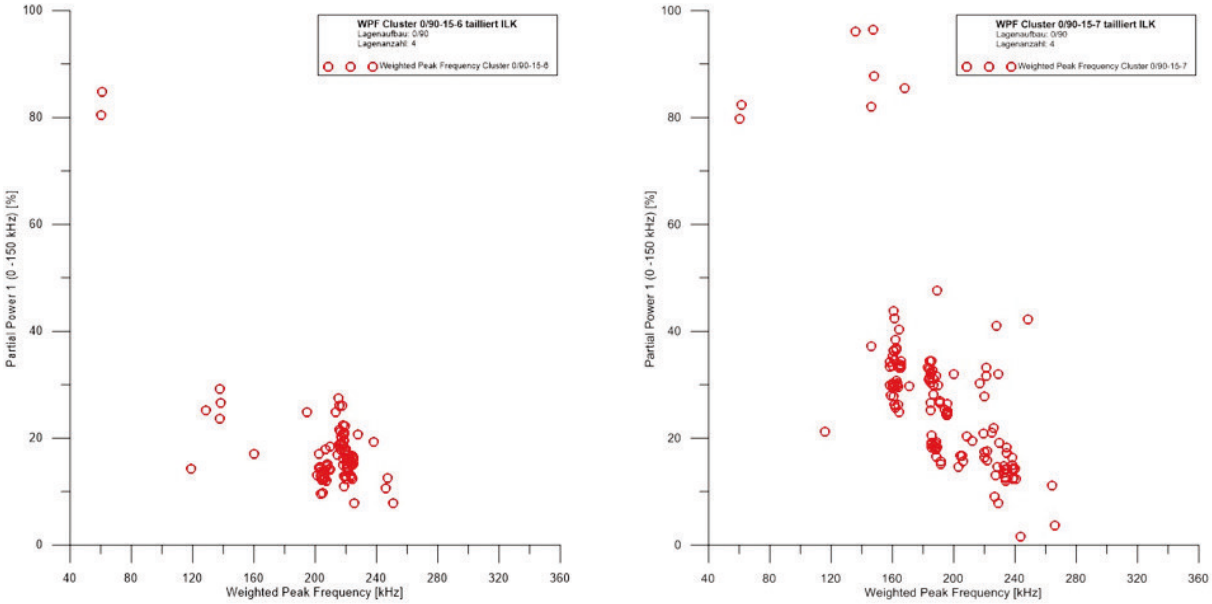


Abbildung 4.7-5 Clusterdarstellung für Proben mit 0/90°-Lagenaufbau; links 0/90-15-6, rechts 0/90-15-7

Die Verteilung entlang der Frequenzachse ist vor allem mit den Ergebnissen der Vorversuche bei der PAG bei der Probe 0/90-15-7 vergleichbar. Dasselbe bezieht sich auf die Clusterausbildung, die nochmals deutlich besser ausgeprägt ist als bei Probe 0/90-15-6. Man kann ein erstes Cluster bei ca. 160 kHz und einem Leistungsbereich von 20% bis 50% der partiellen Leistung 1 erkennen. Das zweite Cluster ist dann bei einer Vorzugsfrequenz von ca. 180 kHz und einer partiellen Leistung 1 von 10% bis 40% zu finden. Ein etwas schwächer ausgeprägtes drittes Cluster kann man auf den Bereich der Vorzugsfrequenz zwischen 220kHz bis 260 kHz und auf einen Leistungsbereich (PP1) von 1% bis 40% eingrenzen. Ein wesentlicher Unterschied bei den 0/90° Proben bei der Darstellung der Schallemissionscluster im Vergleich zu den Darstellungen bei den Vorversuchen ist die Ausbildung der Cluster in einem deutlich geringeren Leistungsbereich der PP1. Die Erläuterung dieses Effekts und die Korrelation zu den CT-Aufnahmen wird im nachfolgenden Kapitel 4.7.2 dargelegt.

Die Proben mit einem ±45° (±45-15-6) Lagenaufbau hingegen zeigen eine veränderte Clusterausbildung als bei den Vorversuchen auf der Universalprüfmaschine. In Abbildung 4.7-6 ist keine eindeutige Clusterausbildung ersichtlich, die auf matrixdominierte Schädigungsmechanismen Rückschlüsse zulassen würde. Genauso verhält es sich beim zweiten Cluster, welches gemäß Theorie für Faser-Matrix-Interface-Versagen steht.

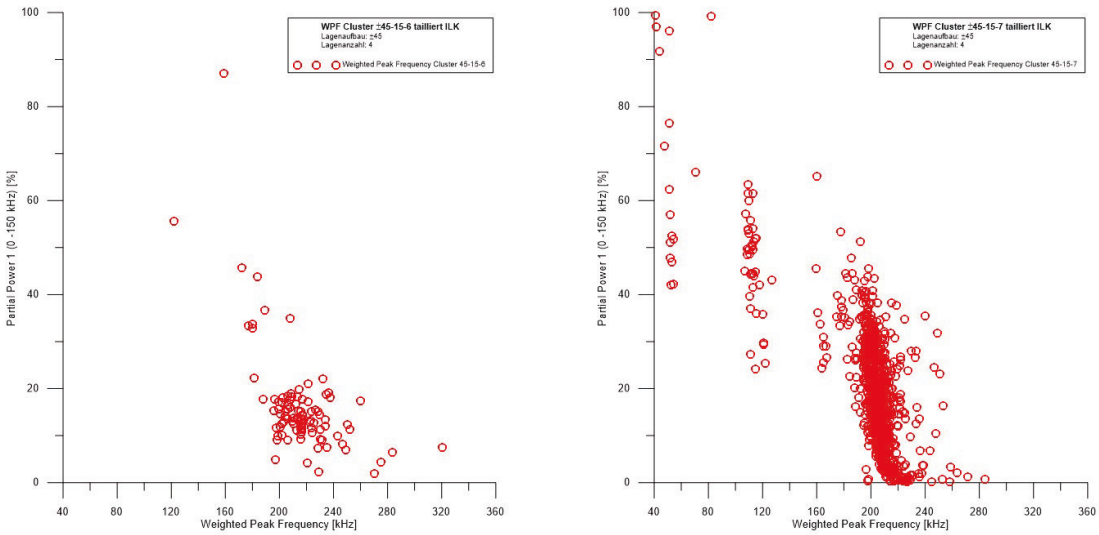


Abbildung 4.7-6 Clusterdarstellung für Proben mit ±45◦-Lagenaufbau; links ±45-15-6, rechts ±45-15-7

Man kann einzelne Schallemissionsmesspunkte z.B. dem Bereich um 180 kHz der gewichteten Vorzugsfrequenz und einem Bereich von 20% und 50% der partiellen Leistung zuordnen, jedoch ist eine sauber getrennte Clusterzuordnung gemäß den Vorversuchen nicht möglich. Cluster drei hingegen ist im Bereich von 200 kHz bis 320 kHz der Vorzugsfrequenz und bis ca. 25% der partiellen Leistung 1 gut ausgeprägt. Auch bei diesem Lagenaufbau war bei den Schallemissionsdarstellungen wieder der deutlich geringere Bereich bei der partiellen Leistung festzustellen, als man von den Ergebnissen der Vorversuche kannte. Außerdem war im Vergleich zu den Vorversuchen auch die Anzahl der Schallemissionssignale geringer. Dies führte zu einer Umstellung des Versuchsaufbaus. Ab sofort wurden die Sensorpaare direkt auf der Probe angebracht, um eine bessere Signalaufzeichnung zu erreichen. Die Abbildung 4.7-7 zeigt den verbesserten Versuchsaufbau. Die Sensoren sitzen nun auf der Probe, sodass sich die empfindliche Piezokeramik etwa einen Zentimeter oberhalb bzw. unterhalb der Spannbacken befindet. Wie bereits aus der Abbildung 4.7-6 für die Ergebnisdarstellung der Probe ±45-15-7 hervorgeht, wurden auf diese Weise deutlich mehr Signale aufgenommen, wodurch die Ausbildung der schadensspezifischen Cluster verbessert wurde.

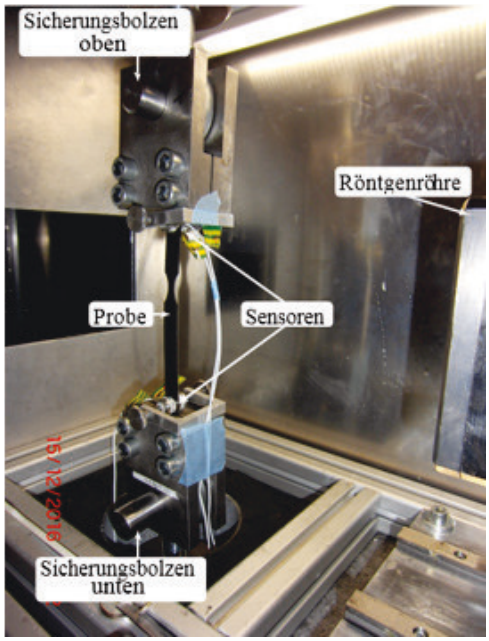


Abbildung 4.7-7 Geänderte Sensorapplikation in-situ-Versuchsaufbau

Durch die geänderte Sensorapplikation bilden sich, wie in Abbildung 4.7-6 rechts (±45-15-7) dargestellt ist, wieder die bekannten drei Cluster aus. Jedoch ist die Verteilung der Schallemissionsereignisse über der Frequenzachse nicht mit den Ergebnissen der Vorversuche vergleichbar. Das erste Cluster bildet sich zwischen 40 kHz und 60 kHz der gewichteten Vorzugsfrequenz aus und erstreckt sich über einen Leistungsbereich von 40% bis 100%. Das zweite Cluster ist bei 120 kHz der Vorzugsfrequenz erkennbar. Dieses umfasst 20% bis 70% der partiellen Leistung. Das dritte Cluster ist am stärksten ausgeprägt und umfasst den Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz von 180 kHz bis 280 kHz. Im Leistungsbereich erstreckt es sich von 1% bis 50% der partiellen Leistung. Anhand der Vorversuche wurden für Proben mit einem ±45° Lagenaufbau die Schallemissionssignale hautsächlich in Cluster eins und zwei erwartet. Das wäre im Bereich von ca. 150 kHz bis ca. 200 kHz der Vorzugsfrequenz. Dieses atypische Verhalten bei der Clusterausbildung der Schallemissionsergebnisse wird in Kapitel 4.7.2 näher untersucht und erläutert. Gleichermaßen mit geänderter Sensorapplikation wurden Proben mit quasiisotropem Lagenaufbau geprüft. Für die beiden Proben QI-15-6 und QI-15-7 wurde wiederum eine deutlich höhere Anzahl an Schallemissionsdaten gemessen und aufgezeichnet. Die folgende Abbildung 4.7-8 stellt die Ergebnisse für die Proben mit quasiisotropem Lagenaufbau dar.

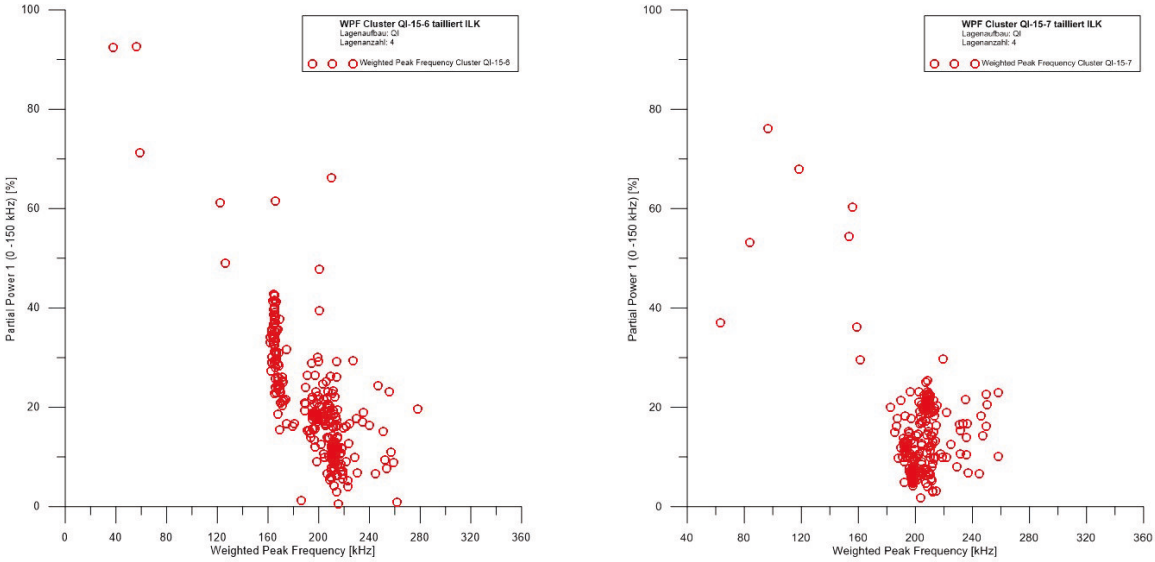


Abbildung 4.7-8 Clusterdarstellung für Proben mit QI-Lagenaufbau; links QI-15-6, rechts QI-15-7

Bei der Probe QI-15-6 sind zwei gut voneinander getrennte Cluster erkennbar. Cluster eins liegt im Bereich von 160 kHz und befindet sich in einem Bereich von 15% bis 45% der partiellen Leistung. Cluster zwei befindet sich in einem Bereich von 180 kHz bis 240 kHz der gewichteten Vorzugsfrequenz und ist auf die ersten 30% der partiellen Leistung 1 verteilt. Einzelne Schallemissionssignale mit gewichteten Vorzugsfrequenzen jenseits der 240 kHz deuten sehr wahrscheinlich auf faserdominierte Schädigungsmechanismen hin. Die geringe Anzahl bei dieser Probe reicht allerdings nicht für die Bildung eines dritten, eigenen Clusters. Ebenfalls fallen vereinzelt Schallemissionssignale im oberen Bereich der partiellen Leistung auf. Diese können auf eine Ablösung von Einzellagen oder Delaminationen innerhalb der Probe deuten. Die zweite geprüfte quasiisotrope Probe QI-15-7 weist eine schwächere Clusterausbildung auf. Es ist lediglich ein großes Cluster erkennbar, was jedoch einen ähnlichen Bereich bei der gewichteten Vorzugsfrequenz und bei der partiellen Leistung darstellt wie das zweite Custer der quasiisotropen Probe QI-15-6. Gleichwohl sind Schallemissionsergebnisse analog zu den

Ergebnissen von Probe QI-15-6 oberhalb von 240 kHz erkennbar, die auf faserdominiertes Versagen hinweisen. Auch sind Schallemissionssignale im oberen Bereich der partiellen Leistung erkennbar, deren Herkunft und Bedeutung im nachfolgenden Kapitel 4.7.2 erläutert werden sollen.

Für die später folgenden, vergleichenden Darstellungen der Schallemissionssignale und der Computertomographieaufnahmen wird im Nachgang anhand der Daten der Probe 0/90-15-7 dieser Übertrag und die daraus resultierende Korrelation dieser grundlegend verschiedenen Datensätze erklärt. In Abbildung 4.7-9 ist der Kraft-Zeitverlauf und die während des Versuches aufgezeichneten Schallemissionssignale dargestellt. Ähnlich wie bei Probe 0/90-15-6 versagt die Probe jenseits der 6000 N. Dies und der zeitlich vergleichbare Schallemissionszuwachs, ansteigend über die steigenden Belastungsstufen, sind Indizien für reproduzierbare Versuchsergebnisse. Es sind darüber hinaus die fünf verschiedenen plateau-artigen Haltebereiche erkennbar, in denen die CT-Untersuchungen durchgeführt wurden.

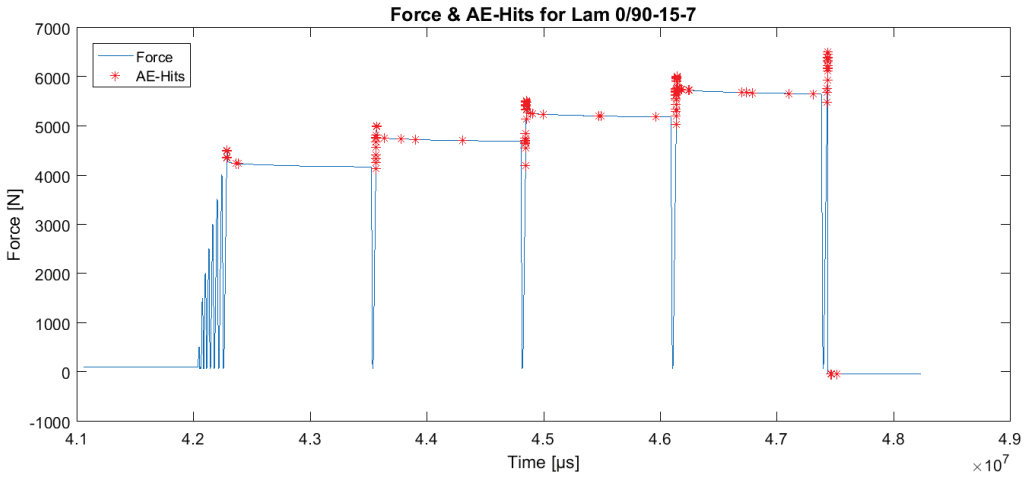
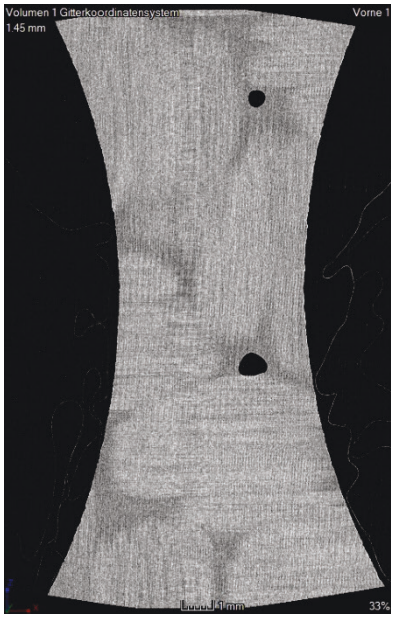
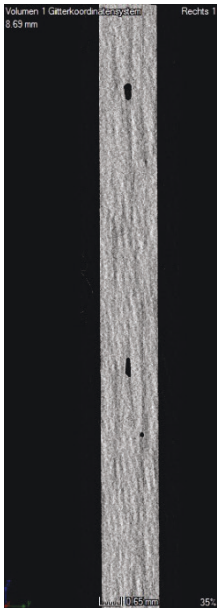


Abbildung 4.7-9 Kraftverlauf für die Probe 0/90-15-7; aufgetretene Schallemissionssignale

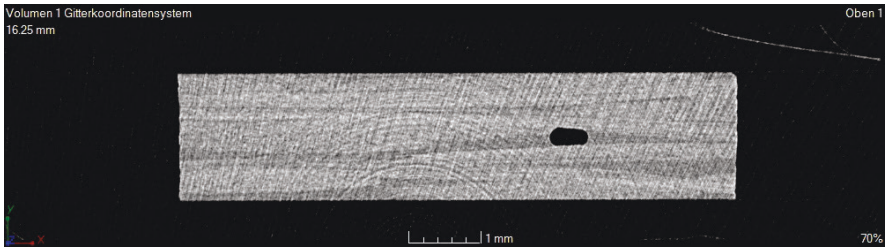
Die Auswertesoftware kann die CT-Aufnahmen in allen drei Raumrichtungen mit einer Schrittweite von 0,01mm darstellen. Das ergibt eine Aufnahmegenauigkeit von ca. 10µm. Bei einem Durchmesser eines Einzelfilaments von ca. 8µm ist folglich ein Einzelfaserbruch nicht aufzulösen, da eine Faser von nur einem Voxel dargestellt wird. Die Schallemissionsanalyse ist allerdings eine statistische Messmethode und somit sind Einzelfaserbrüche nicht von großer Relevanz, wohingegen Faserbündelbrüche in den CT-Aufnahmen erkennbar sein sollten und zu einer Häufung von Schallemissionsereignisse führen.



Schnitt durch die x-z-Ebene



Schnitt durch die x-y-Ebene



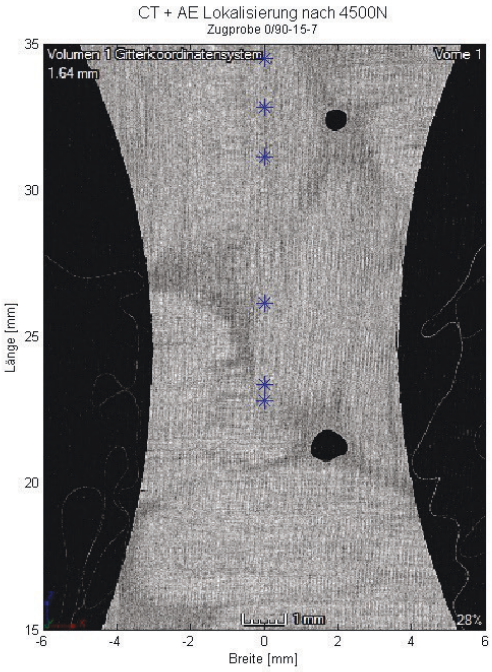
Schnitt durch die x-y-Ebene der unbelasteten

Abbildung 4.7-10 CT-Aufnahmen der unbelasteten Probe 0/90-15-7 in allen Raumrichtungen

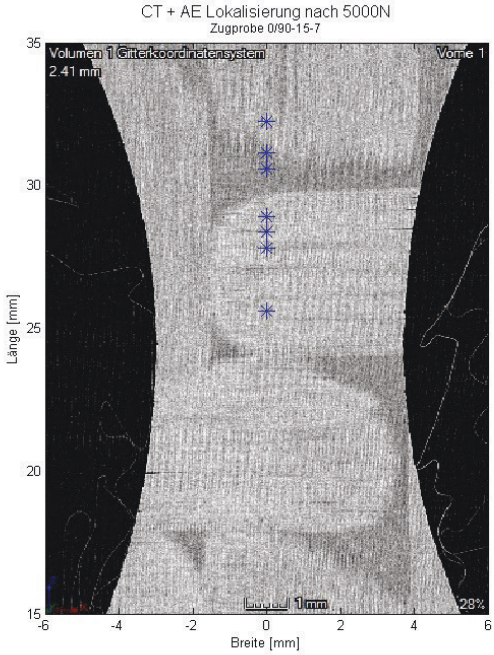
Als Voxel werden die Gitterpunkte in einem dreidimensionalen Bild bezeichnet. Sie sind damit das Gegenstück zum Pixel im zweidimensionalen Raum. Die CT-Aufnahmen in Abbildung 4.7-10 zeigen den unbelasteten Ausgangszustand der Probe in allen drei Raumrichtungen. Es sind verhältnismäßig große Fehlstellen erkennbar, die auf herstellungsbedingte Fertigungsfehler zurückzuführen sind. Die dunklen Bereiche sind sehr wahrscheinlich nicht oder unvollständig mit Matrixmaterial befüllt. Man spricht hier auch von Harzarmut. Solche Fehlstellen schwächen den Werkstoff und können Ausgangspunkt von weiteren Schädigungen sein. Durch die Darstellung der CT-Aufnahmen in allen drei Raumrichtungen kann die Größe und die Lage der Fehlstellen festgestellt werden. Des Weiteren geben die CT-Aufnahmen nicht nur Hinweise auf den unbelasteten Fertigungszustand der Proben, sondern zeigen außerhalb der Probe helle, schleifenförmige Linien, welche auf die Schutzfolie zurückzuführen sind. Diese Art der Störungen verschlechtert die Qualität der Abbildung in probeninternen Strukturen kaum, wohingegen die radialen und linearen Störungen und Artefakte sehr wohl einen Einfluss auf die Qualität der Aufnahmen im Innern der Probe haben können. Besonders negativ wirkt sich dieses Signalrauschen auf den Hintergrundbereich aus. Ein unverrauschter Hintergrund zeichnet sich durch eine schwarze Farbgebung aus.

Im Nachgang wurden die Schallemissionsdaten auf den relevanten Ausschnitt der x-z-Ebene, der Ebene mit erkennbarer Schädigung und Schadensentwicklung, im Bereich der lokalisierten Schallemissionssignale übertragen. Die Lokalisierung erfolgte eindimensional und die Schallemissionssignale wurden entlang der z-Achse dem x-Wert=0 zugeordnet und wie in Abbildung 4.7-11 gezeigt, dargestellt. Aus den Grafiken in Abbildung 4.7-11 ist zu erkennen, dass mit steigender Belastungsstufe die Anzahl der Schallemissionsereignisse erwartungsgemäß steigt. Der Wert im linken oberen Bildrand gibt die jeweilige Tiefe in der Probe an (entlang der y-Achse), woraus das dementsprechende Schnittbild entnommen ist. Es ist zu beachten, dass nicht immer alle Schallemissionssignale einem direkt ersichtlichen Schadensbild / Wachstum zuzuweisen sind, da diese ebenfalls aus einer anderen Ebene resultieren können. Es wurden folglich nur Schnittbilder erzeugt und dargestellt, bei denen ein ersichtlicher Schaden in einem Bereich von lokalisierten Schallemissionsereignissen erkennbar ist.

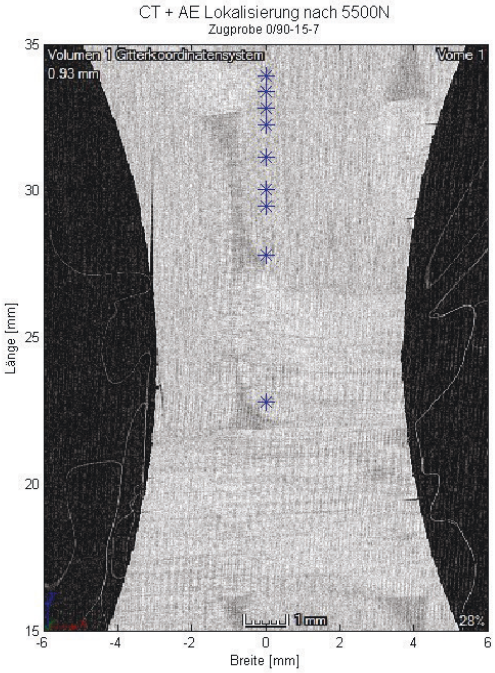
Bei der Darstellung nach einer Zugbelastung von 4500 N sind optisch kaum Schäden zu erkennen. Die dabei aufgezeichneten Schallemissionssignale deuten sehr wahrscheinlich auf interne Matrixrisse hin. Im oberen Bereich des Prüflings könnten die Schallemissionssignale auf das Wachstum eines durch eine fertigungsbedingte Vorschädigung hervorgerufenen Schadens im Werkstoff hinweisen. Bereits bei der nächsten Belastungsstufe von 5000 N ist ein Wachstum gewisser Risse im Randbereich erkennbar und somit ein Fortschritt des Schädigungszustandes sichtbar. Man kann teilweise sehen, dass sich Risse entlang der Faserorientierung (intralaminare Schädigungen bei z=29mm) ausbreiten, die nur in dieser Faserebene zu finden sind. Bei erneuter Erhöhung der Belastung auf 5500 N sind im selben Bereich geringere Schäden zu erkennen, wohingegen auf der linken Probenseite eindeutig ein Riss (Risswachstum) als Schaden entstanden ist, der den Schallemissionssignalen bei z=30mm zugewiesen werden können. Genauso findet man am linken Probenrand Signale bei z=23mm, die eine gute Übereinstimmung mit der Schwächung der Probe besitzen. Hier beobachtet man, dass der Schaden senkrecht zur Faserorientierung verläuft und folglich auch faserdominierte Schädigungsmechanismen beinhalten muss. Ebenso können im oberen Bereich horizontale Risse an der rechten Probenseite identifiziert werden, die der Häufung der Schallemissionssignale zugeordnet werden können. Es kann folglich das Risswachstum in eben diesem Bereich für die höheren Schallemissionsaktivitäten verantwortlich sein. Die vierte und letzte Darstellung in Abbildung 4.7-11 zeigt den Prüfling kurz vor dem Versagen. Diese Aufnahme wurde in derselben Tiefe wie die nach einer Belastung von 5000 N aufgenommen. Bemerkenswert dabei ist, dass die horizontalen Risse an der rechten Probenflanke kein gravierendes Wachstum aufweisen. Anders verhält es sich auf der linken Seite, wo ein eindeutig ausgeprägter Riss zu erkennen ist, dem gleichermaßen Schallemissionssignale zwischen z=25mm und z=30mm zugewiesen werden können. In dieser Schnitttiefe können bei dieser Belastungsstufe keine weiteren Signale zu bildlich dargestellten Schäden zugeordnet werden. Dies könnte damit zusammenhängen, dass diese Schäden entweder in anderen Tiefen zu finden oder auf interne Matrixschäden zurückzuführen sind, die aufgrund der Auflösung oder des hohen Rauschanteils nicht erkannt wurden konnten.



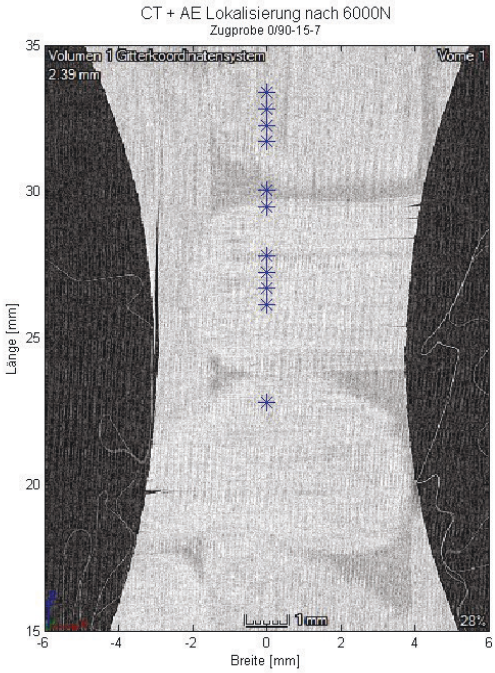
Schnitt durch die x-z-Ebene bei 4500 N



Schnitt durch die x-z-Ebene bei 5000 N



Schnitt durch die x-z-Ebene bei 5500 N



Schnitt durch die x-z-Ebene bei 6000 N

Abbildung 4.7-11 CT-Aufnahmen der Probe 0/90-15-7 während unterschiedlicher Belastungsstufen, blau gekennzeichnet sind Schallemissionsereignisse

Nicht jedem Schädigungsereignis können bei dieser Messreihe Schallemissionssignale zugeordnet werden. Bei der Belastungsstufe von 6000 N ist beispielsweise bei z=20mm an der linken Probenseite eine Schadensentwicklung zu erkennen. Dieser horizontale Riss ist sogar bei der Aufnahme während einer Belastung von 5500 N zu erkennen, zeigt aber keine Schallemissionsaktivität. Der Grund dafür könnte eine fehlerhafte Lokalisierungsberechnung der Schallemissionssignale sein, die möglicherweise auf potentiell veränderte Ausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb der Probe unter Last zurückzuführen sind. Die Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde für die Versuchsreihe bei einer gering belasteten Probe durchgeführt. Die Schallemissionssignale, die unter hoher Belastung erfasst wurden, wurden auf Basis der am Anfang ermittelten Wellengeschwindigkeit der unbelasteten Probe geortet.

Guz erläuterte 2002 mathematische Grundlagen der Geschwindigkeitsänderung von Oberflächenwellen in belasteten Proben [51].

In dieser Veröffentlichung wird die Wellenausbreitung entlang von einfachen und geschichteten flachen Proben, kugelförmigen und zylinderförmigen Proben sowie die Ausbreitung in hydroelastischen Systemen in Abhängigkeit einer zusätzlich eingebrachten Kraft untersucht. Es wird beschrieben, dass für jede Mode ein Frequenzbereich existiert, in dem die Änderung der Phasengeschwindigkeit durch die eingebrachte Spannung nicht von der Frequenz abhängt. Genauso gibt es einen Bereich, bei dem die Änderung sehr stark von der Frequenz beeinflusst wird. Dazu kommt, dass dieses beschriebene Verhalten charakteristisch für Lamb-Wellen, SH-Wellen und Torsionswellen ist [51]. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Wellen eines Signals mit zunehmendem Krafteintrag in der Probe mit verschiedenen Phasengeschwindigkeiten ausbreiten. Dies und der noch hohe Rauschanteil in den CT-Aufnahmen führt zu einer weiteren Bildbearbeitung, um die Ergebnisse noch genauer auseinanderhalten und beschreiben zu können und wird in Kapitel 4.7.2 näher ausgeführt.

4.7.2 Analyse und Ergebnisdiskussion

Dieses Kapitel dient der vergleichenden Betrachtung unterschiedlicher Schallemissionsparameter. So wird insbesondere auf die differente Ausbildung der verschiedenen Cluster hinsichtlich der partiellen Leistung und der gewichteten Vorzugsfrequenz bei den Vorversuchen für die in-situ-Versuche und den in-situ-Versuchen selbst dargestellt. Des Weiteren wird auf Daten- und Bildbearbeitung der CT-Aufnahmen eingegangen und die Korrelation mit Schallemissionsparametern erläutert. Darüber hinaus wird die noch nicht erklärbare Ausbildung eines zusätzlichen Schadensclusters, welches keinem der bisher bekannten Schädigungscluster zuordenbar ist, diskutiert.

Bei der Auswertung und Darstellung der Schallemissionssignale im WPF-PP-Plot für die Vorversuche, bildete sich bei einigen Proben ein zusätzliches Cluster, das weder zu den Clustern der matrixdominierenden Schädigungsarten noch zu den Clustern der faserdominierenden Schädigungsmechanismen zugeteilt werden kann. Dieses „Zwischencluster“ ist besonders gut in Abbildung 4.6-4b in Kapitel 4.6.3 zu erkennen und bildet sich immer zwischen Cluster zwei und Cluster drei aus. Um die Ursache dieses Clusters verstehen zu können, wurden weitere Parameter untersucht. Dazu gehörten die zeitliche Auflösung, die maximale Amplitude und der Energiegehalt der Schallemissionssignale, die Burstlänge und die Anstiegszeit zum Amplitudenmaximum. Beispielhaft für diese gesonderte Auswertung steht das Laminat 967, bei dem sich um ein Laminat mit einem 0/90°-Lagenaufbau

handelt und nicht tailliert ist. Bei dieser Probe bildete sich das zusätzliche Cluster genauso deutlich wie die aus der Literatur bekannten regulären Cluster.

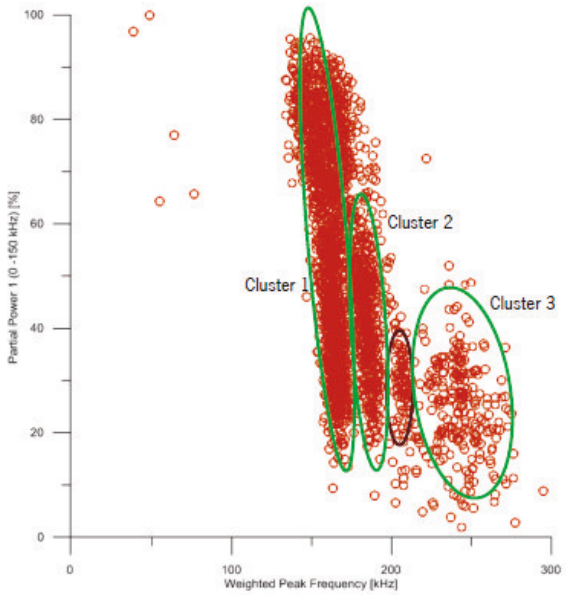


Abbildung 4.7-12 Beispiel für zusätzliches Cluster bei 0/90°-Zugprobe

In Abbildung 4.7-12 sind die Schallemissionsereignisse von 0/90° Zugproben dargestellt. Die Probe ist mit 25mm Breite die Standardprobe für Zugversuche. Cluster eins und zwei liegen sehr nahe beieinander und vor allem Cluster eins umfasst einen sehr großen PP1-Bereich. Das dritte Cluster grenzt sich deutlich zum zweiten ab.

Clusterausbildung über Zeitverlauf

Zur Identifikation der zeitlichen Verteilung der Schallemissionssignale über der Gesamtversuchszeit wurden den einzelnen Schallemissionssignalen unterschiedliche Farben (frühes Signal blau, spätes Signal rot) in der nachfolgenden Darstellung zugewiesen. In Abbildung 4.7-13b kann man die farbliche Zuordnung der Schallemissionssignale in den verschiedenen Lastrampen erkennen. Die frühen Schallemissionssignale (blau bis grün) kommen hauptsächlich im Bereich von 140 kHz bis 160 kHz und um 190 kHz bei einem Leistungsbereich von 20% bis 80% der partiellen Leistung vor. Die Schallemissionssignale kurz vor Versagen der Probe (rötlich gekennzeichnet) treten vermehrt in einem Bereich von 70% bis 100% der partiellen Leistung auf und sind von der Anzahl am häufigsten. Es zeichnet sich folglich ab, dass Schallemissionsereignisse mit geringer gewichteter Vorzugsfrequenz, aber einem hohen Anteil am ersten Leistungsband, tendenziell gegen Ende des Versuches auftreten.

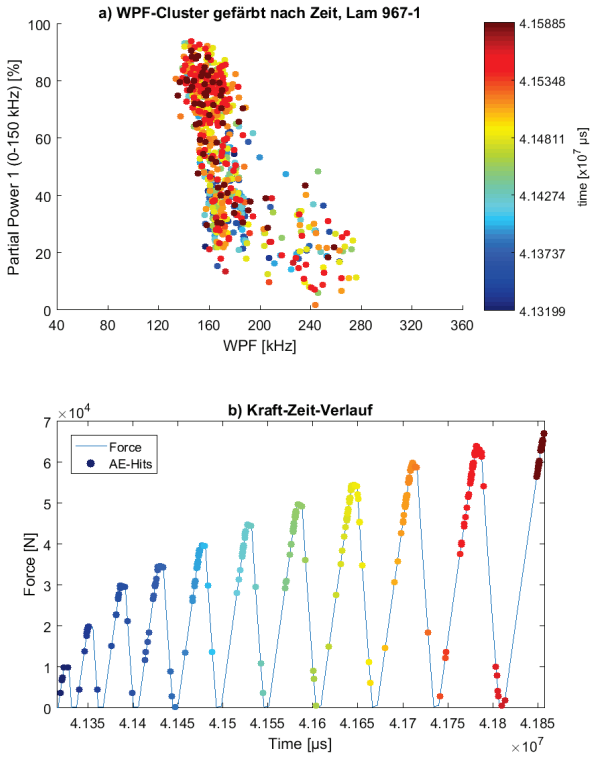


Abbildung 4.7-13 Clusterverteilung des Laminates 967-1 und Kraftverlauf, farbliche Kennzeichnung des Auftretens der Schallemissionsereignisse

Dies lässt den Schluss zu, dass während der gesamten Versuchsdauer sowohl matrixdominierte als auch faserdominierte Schädigungsmechanismen auftreten. Im dritten Cluster, welches für die faserdominierten Schädigungsmechanismen steht, sind ebenfalls Schädigungsereignisse über dem gesamten Versuchszeitraum zu erkennen. Jedoch ist der Anteil der Schallemissionsereignisse vom Versuchsbeginn (blau bis grün) niedriger als die Schallemissionsereignisse gegen Ende des Versuches (orange bis rot). In diesem Bereich sind folglich eher faserdominante Schädigungsereignisse zu finden. Die zeitliche Auflösung der Schallemissionsereignisse während eines gesamten Versuchs liefert allerdings keine neuen Informationen für das Entstehen des Zwischenclusters. Das Cluster befindet sich im Bereich von 200 kHz und 40% der partiellen Leistung und es sind dort Schallemissionsereignisse zu finden, die gleichmäßig während der Versuchsdauer entstanden sind.

Amplitudenverteilung und Zuordnung zu Clustern

In nachfolgender Abbildung 4.7-14 ist die nähere Untersuchung der Amplitude der jeweiligen Schallemissionssignale ebenfalls in einer farbkodierten Darstellung exemplarisch für die Probe 967-1 dargestellt. Die maximalen Amplituden aller Schallemissionssignale liegen dabei zwischen 55 dB AE und 77 dB AE. Schallemissionssignale mit niedriger Maximalamplitude sind gehäuft in den ersten beiden Clustern bis zu einer partiellen Leistung von 50% zu verzeichnen. Im dritten Cluster, welches für faserdominierende Schädigungsarten steht, findet man eher Schädigungsereignisse mit höheren Maximalamplituden (grün, orange).

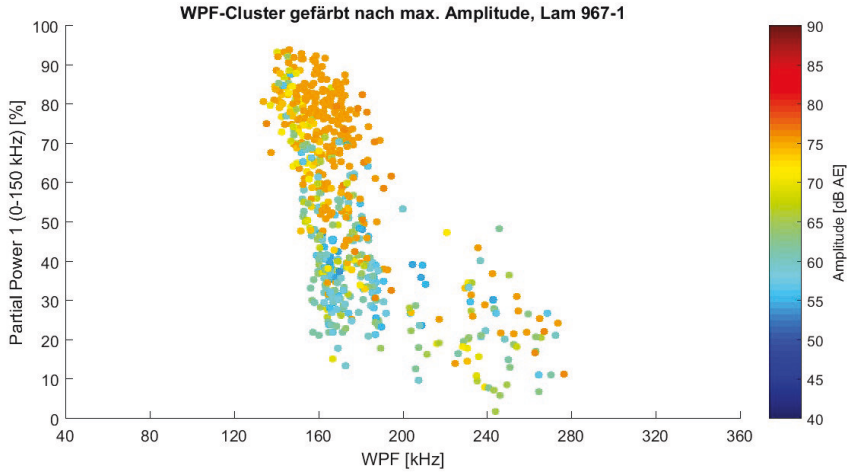


Abbildung 4.7-14 Clusterdarstellung Probe 967-1 mit farblicher Kodierung der maximalen Amplitudenwerte

Auffallend ist, dass in den ersten beiden Clustern ab einer partiellen Leistung von 60% fast ausschließlich Signale mit hohen Maximalamplituden zu verzeichnen sind. Aufgrund einer unterschiedlichen Farbkodierung in Abbildung 4.7-13 dieser Signale, kann kein Zusammenhang zum Zeitpunkt der Signalaufnahme hergestellt werden. Da die Schallemissionssignale des Zwischenclusters in einem vergleichbaren Bereich der Amplitude wie die Schallemissionssignale in den anderen drei Clustern liegen, ist eine Aussage über den Ursprung des Zwischenclusters mit der Amplitudenzuordnung ebenfalls nicht möglich. Jedoch ist ein Zusammenhang zwischen der maximalen Amplitude und der partiellen Leistung zu erkennen. Folglich haben Schallemissionssignale mit höherer Maximalamplitude eine höhere partielle Leistung. Dasselbe gilt für die gewichtete Vorzugsfrequenz, bei der bei hohen Maximalamplituden tendenziell höhere gewichtete Frequenzen berechnet wurden.

Energiegehalt der Cluster

Zur Untersuchung des Energiegehalts wird die Burst-Energie der einzelnen Schallemissionssignale farbkodiert in Abbildung 4.7-15 dargestellt. Die Farbskala spannt dabei einen Bereich von 10^{-6} bis 1pJ (1pJ = 10^{-12}J) auf und wird logarithmisch aufgetragen, da die Schallemissionssignale eine sehr kleine Energie besitzen. Cluster eins ist bis zu einer partiellen Leistung von ca. 60% überwiegend blau eingefärbt. Mit steigender partieller Leistung wechselt die Farbkodierung in den hellgrünen Bereich und diese Signale sind um einen Faktor von 10^2 größer. Dieselbe Systematik ist auch beim Farbverlauf des zweiten Clusters zu erkennen und geht ab einer partiellen Leistung von ca. 70% in den orangenen Bereich über. Diese Schallemissionssignale haben einen gewichteten Frequenzbereich von 160 kHz bis 190 kHz und verfügen über die größten Einzelenergien aller Schallemissionssignale. Gemäß der Theorie waren diese Signale eher im dritten Cluster erwartet, das für faserdominierende Schädigungsmechanismen steht. Es gibt im dritten Cluster vereinzelt energiereiche Signale, der Hauptteil ist jedoch im niedrigen Energiebereich (blau und türkis) und mit einem Energiegehalt bis 10^{-3}pJ.

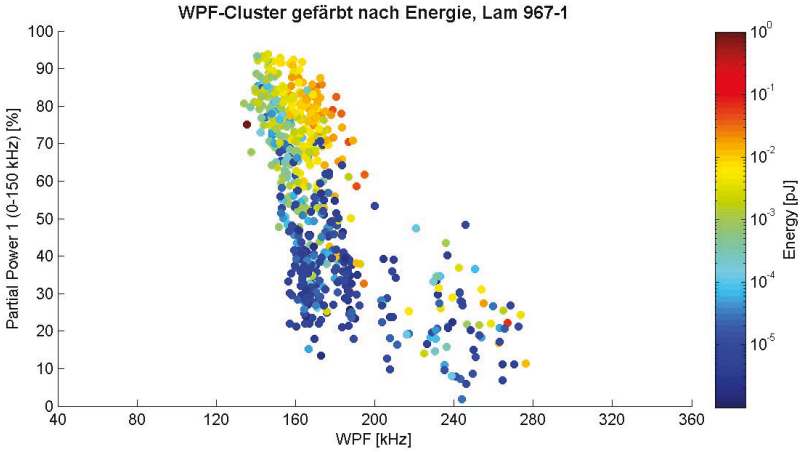


Abbildung 4.7-15 Clusterdarstellung der Probe 967-1, farbliche Kodierung des Energiegehaltes der Schallemissionssignale

Die Betrachtung der Burstenergien im Zwischencluster bei einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 200 kHz weist keine Auffälligkeiten auf. Die Energien der Schallemissionssignale sind mit denen der ersten beiden Cluster vergleichbar und zeigen niedrige Energiewerte. Wie bereits diskutiert besitzen Schallemissionssignale im dritten Cluster ebenfalls teilweise niedrige Energien und folglich ist dieser Parameter für die Unterscheidung von Schadenstypen und für die Ursachenfindung des Zwischenclusters nicht geeignet.

Clusterverteilung nach der Anstiegszeit

Als nächstes wurde die Anstiegszeit (Risetime) untersucht. Dabei wurde der Zeitabschnitt vom Ersteinsatz des Signals bis zum Erreichen der Maximalamplitude analysiert. Für die Darstellung dieser Auswertung in Abbildung 4.7-16 muss ebenfalls eine logarithmische Skalierung verwendet werden, da die Daten einen großen Wertebereich abdecken.

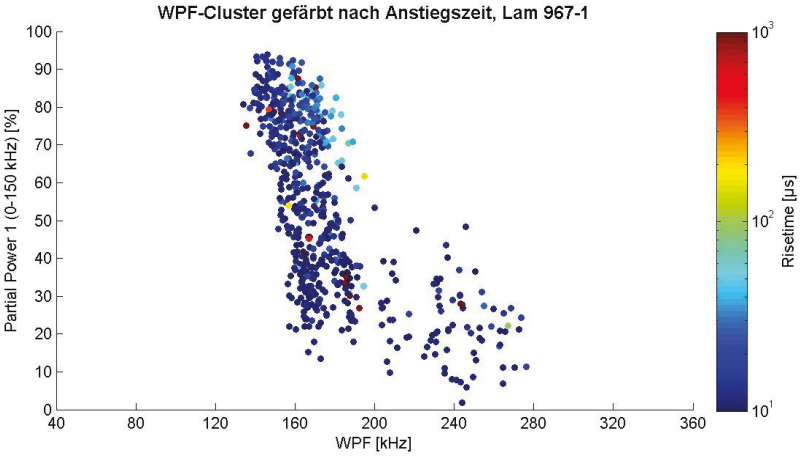


Abbildung 4.7-16 Clusterdarstellung der Probe 967-1, farblich kodiert ist die Anstiegszeit des Ersteinsatzes bis zur maximalen Amplitude des Signals

Hauptsächlich sind die Anstiegszeiten der Schallemissionssignale in einem Bereich von 10µs bis 100µs zu finden. Vereinzelt gibt es allerdings Schallemissionssignale mit einer deutlich höheren Anstiegszeit von mehr als 1000µs zu verzeichnen. Die Anstiegszeit gibt daher wenig Aufschluss über die verschiedenen Schädigungscluster und über das Zwischencluster, da annähernd alle Schallemissionssignale blau dargestellt sind und eine kleine Anstiegszeit haben.

Die Signale mit langen Anstiegszeiten lassen sich nicht zu einem einheitlichen Cluster zusammenfassen, da sie über einen Großteil des Frequenzbereiches der gewichteten Vorzugsfrequenz verteilt sind (120 kHz bis 240 kHz). Um die deutlichen Unterschiede der Anstiegszeiten besser untersuchen zu können, wurden verschiedene Zeitreihen untersucht. Exemplarisch ist ein solches Zeitsignal in Abbildung 4.7-17 abgebildet. Man erkennt schnell, dass es bei diesem Signal Mehrfacheinsätze gibt und dabei die Maximalamplitude erst kurz nach 2000µs erreicht wird. Ein solcher Signalverlauf ist für die Auswertung und Weiterverarbeitung der Daten problematisch. Es kommt zu einer Verfälschung der Maximalamplitude, der Anstiegszeit und Signallänge, die die Berechnung des Energiegehaltes und die der gewichteten Vorzugsfrequenz beeinträchtigen.

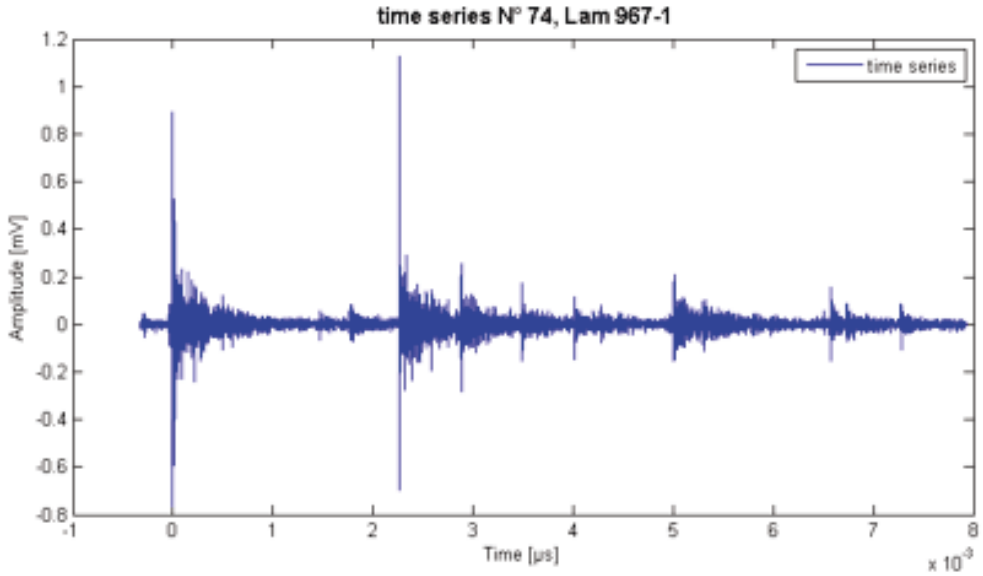


Abbildung 4.7-17 Zeitreihe des Signals 74 der Probe 967-1

Clusterverteilung nach der Signallänge

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem vorangegangenen Kapitel ist es von essentieller Bedeutung, Signale mit Mehrfacheinsätzen zu erkennen. Für den Vergleich von fehlerhaften Signallängen und deren Auswirkung auf im Nachgang berechnete Schallemissionsparameter wurden die Zeitreihen und deren Frequenzspektren für die längsten fünf Signale analysiert und in Abbildung 4.7-18 dargestellt, und um die Clusterdarstellung mit Farbkodierung gemäß der Burstlänge erweitert, um festzustellen, ob die Signalgesamtlänge auf ein Cluster im Besonderen verweist. Dies ist anhand der Clusterdarstellung zu verneinen, die darlegt, dass in allen Bereichen Signale mit langer Dauer erfasst wurden. Die längsten Signale sind für diese Probe im ersten Cluster zu finden. Abbildung 4.7-18 zeigt folglich die Amplitudenspektren und die jeweiligen Signale. Es fällt auf, dass bei den ersten drei Zeitreihen 1375, 241 und 6 nach dem Ersteinsatz zum einen nur geringe Mehrfacheinsätze gemessen wurden und zum anderen die Messungen bei einem deutlich früheren Zeitpunkt hätten gestoppt werden müssen. Die Zeitreihen 1051 und 56 hingegen beinhalten klar identifizierte Mehrfacheinsätze, bei denen der RMS-Wert zur Bestimmung der Signallänge eindeutig überschritten wurde. Das Überschreiten der Signallänge liegt an einer zu großen RMS-Fensterlänge die das Ende eines Signals berechnet und in diesem Fall bei U_{eff} = 1043 Samples gesetzt wurde. Bei der Berechnung des Signalendes wird der minimale und maximale RMS-Wert des aufgezeichneten Signals ermittelt und die Differenz der Werte wird als 100% der Amplitudenvariation gesetzt. Das Signal wird

als beendet definiert, sobald der RMS-Wert kleiner als 10% der Amplitudenvariation des gesamten Signals ist. Um Mehrfacheinsätze zu verhindern und um ein früheres, korrektes Signalende herbeiführen zu können, muss die Fensterbreite des RMS-Wertes folglich verkleinert werden.

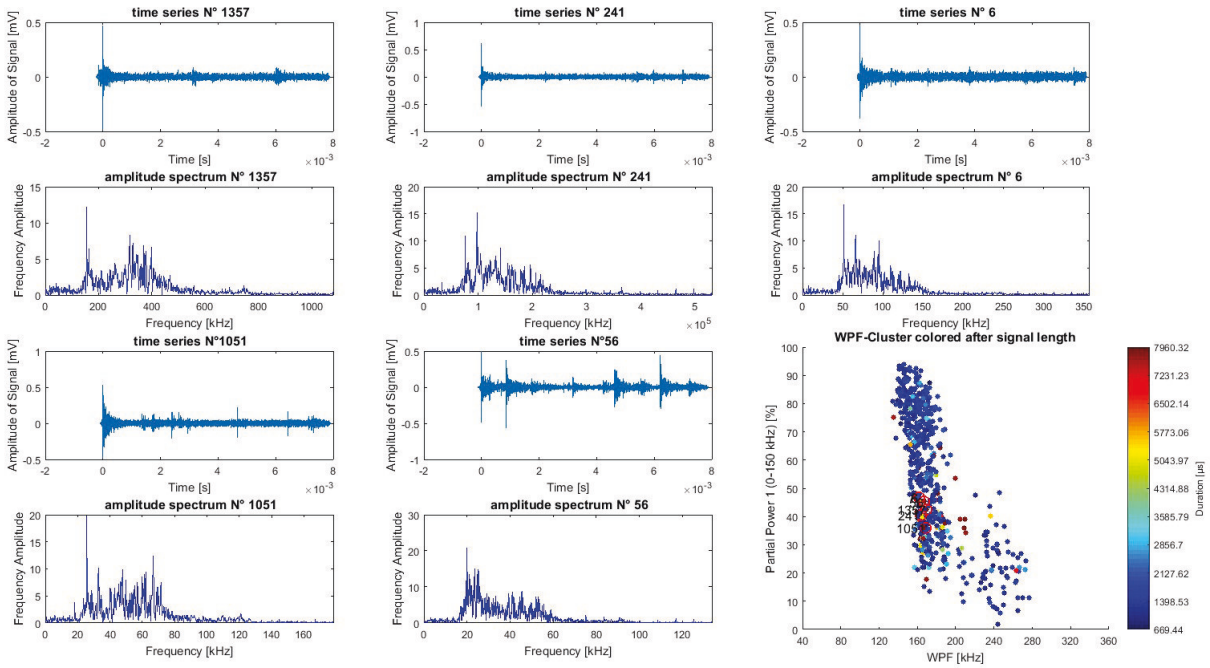


Abbildung 4.7-18 Zeitreihen mit Frequenzspektren der fünf längsten Signale; Clusterdarstellung gefärbt nach der Signallänge

Deshalb wurde die Messreihe nochmals mit zwei verkürzten Fensterlängen ausgewertet und in den jeweiligen charakteristischen Zeitreihen aufbereitet und in Abbildung 4.7-19 dargestellt. Man kann die unterschiedlichen Längen der Effektivkurven gut im Vergleich zu einem ungekürzten Zeitsignal erkennen.

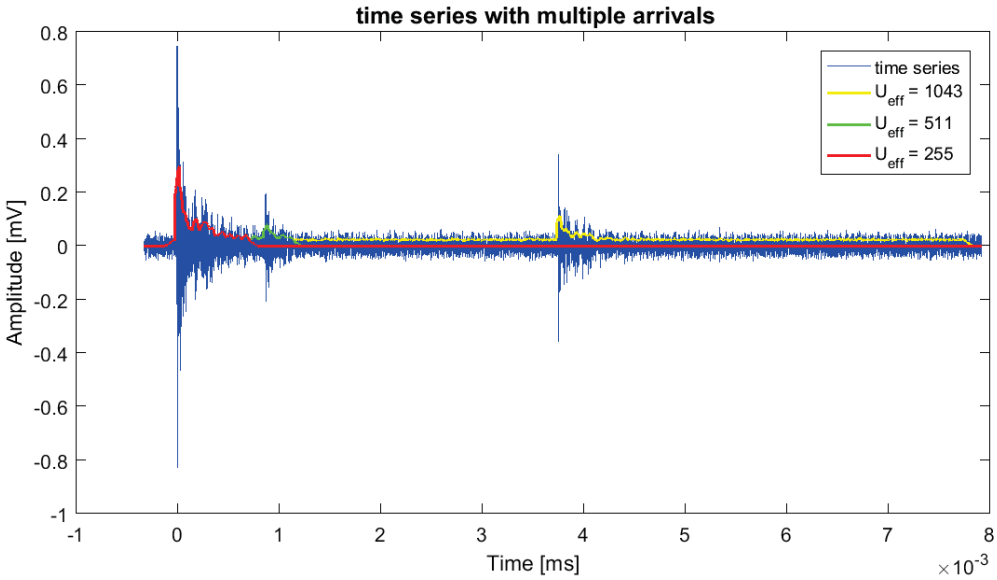
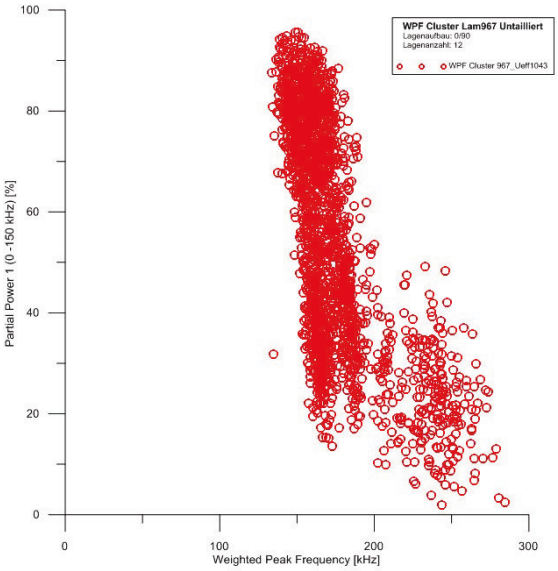
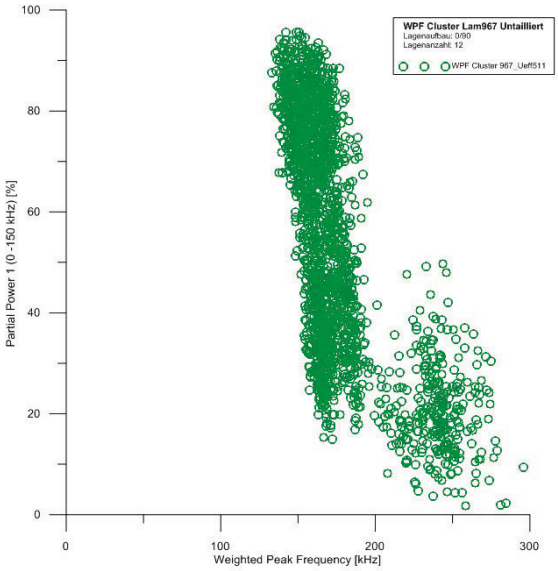


Abbildung 4.7-19 Signallänge mit verschiedenen Ueff -Werte

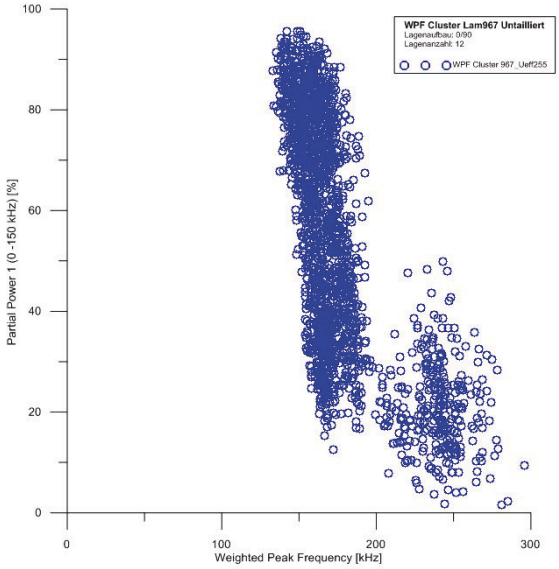
Bei einem Effektivwert von U_{eff} = 1043 Samples wird annähernd die gesamte Zeitreihe als Burst betrachtet. Bei der Kurve des Effektivwertes U_{eff} = 511 werden Amplituden nach dem zweiten Einsatz mit einbezogen und beim geringsten Effektivwert von U_{eff} = 255 wird lediglich der Ersteinsatz betrachtet und die Kurve fällt danach auf einen Wert von Null ab. Dies ist der Beweis für eine anfänglich zu große Fensterwahl von U_{eff} = 1043. Die Daten zur Clusterdarstellung wurden danach nochmals mit den veränderten Effektivwerten U_{eff} = 511 und U_{eff} = 255 neu berechnet und in folgender Abbildung 4.7-20 gegenübergestellt. Es ist ein Unterschied in der Clusterausbildung zwischen den Darstellungen mit den Effektivwerten U_{eff} = 1043 Samples und U_{eff} = 511 Samples zu erkennen. Cluster drei grenzt sich deutlicher zu den ersten zwei Clustern ab und das Zwischencluster ist in Abbildung 4.7-20b annähernd ganz verschwunden.



(a) U_{eff} = 1043



(b) U_{eff} = 511



(c) U_{eff} = 255

Abbildung 4.7-20 Clusterdarstellungen mit unterschiedlichen Effektivwerten

Gleichzeitig zeichnet sich das dritte Cluster genauer ab als in Abbildung 4.7-20a. Die Clusterausbildung mit den beiden niedrigeren Effektivwerten ist vergleichbar und in Abbildung 4.7-20b und Abbildung 4.7-20 (c) vergleichend dargestellt. Das Zwischencluster ist verschwunden. Bei zu großer Fensterlänge kann anhand der hier dargestellten Ergebnisse eine falsche und zusätzliche Vorzugsfrequenz berechnet werden die das Ergebnis verfälscht. Es verschoben sich beispielsweise Schallemissionsereignisse die zuvor bei einer gewichteten Vorzugsfrequenz von 200 kHz lagen in Richtung drittes Cluster, da das dritte Cluster mit einer Auswertung mit kurzer Signallänge einen kleineren Frequenzanteil hat und die gewichtete Vorzugsfrequenz höhere Werte annimmt. Deshalb sinken auch in diesem Bereich die partiellen Leistungen da der Frequenzanteil bis ca. 150 kHz kleiner ausfällt. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das aus einigen Darstellungen der vorangegangenen Voruntersuchungen bekannte Zwischencluster keine Rückschlüsse auf Schädigungsmechanismen schließen lässt. Es ist vielmehr eine fehlerhafte Berechnung, die aus einem zu großen Fenster bei der Bildung des Effektivwertes resultiert. Erläuternd hierzu werden in nachfolgender Abbildung 4.7-21 die fünf längsten Signale dargestellt, nachdem die Signallänge mit einem Effektivwertfenster von Ueff = 255 Samples neu berechnet wurden. Es fällt sofort auf, dass die meisten langen Signale ein Übersteuern aufweisen, das entsteht wenn der Spannungsbereich eines AD-Wandlers des Empfangsgerätes zu klein ist, um die maximalen, gemessenen Amplituden zu verarbeiten. Die Signale werden demnach horizontal beschnitten, bis sie wieder in den Verarbeitungsbereich gelangen. In der Zeitreihe 56 in Abbildung 4.7-21 kann allerdings trotz der Verwendung des deutlich geringeren Effektivwertes von Ueff = 255 Samples ein klarer Zweiteinsatz erkannt werden und die Clusterdarstellung in dieser Abbildung beinhaltet eindeutig kleinere Werte der Signallängen, was sich auf das Minimum und Maximum der Farbskala auswirkt.

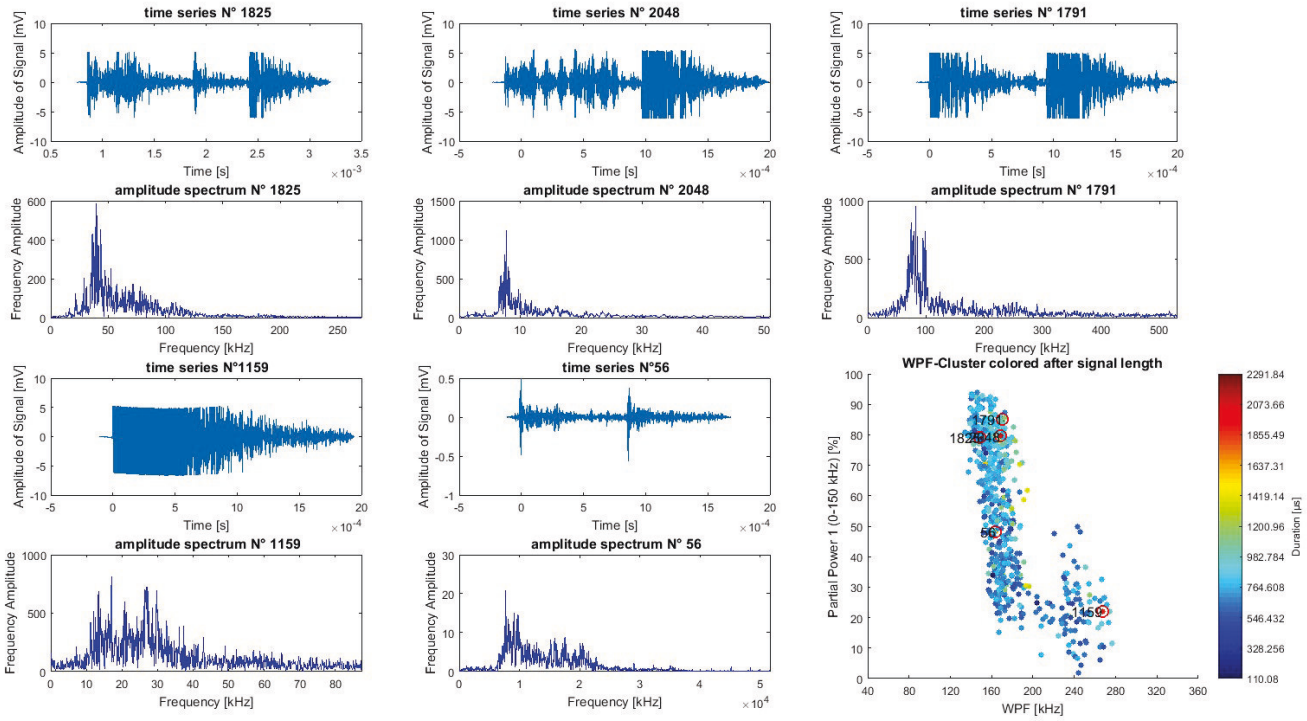


Abbildung 4.7-21 Zeitreihen und Frequenzspektren der fünf längsten Signale; Clusterdarstellung mit farbkodierter Signallänge für eine Fensterlänge von Ueff = 255

Übersteuerte Signale können gleichermaßen zu fehlerhaften Berechnungen der gewichteten Vorzugsfrequenz wie zu Mehrfacheinsätzen führen. Um dies zu überprüfen wurde getestet, ob die Einhüllende jedes Signals einen festgelegten Grenzwert über eine definierte Zeit überschreitet. Zusätzlich wurde überprüft, ob nach einem Ersteinsatz und dem Abklingen eines Signals der Anstieg zwischen zwei Datenpunkten der Zeitreihe erneut ansteigt. Sind diese Kriterien erfüllt, handelt es sich um einen Mehrfacheinsatz und das Signal wird unmittelbar vor dem Zweiteinsatz abgeschnitten und fließt folglich nicht weiter in die Auswertung mit ein (Abbildung 4.7-22).

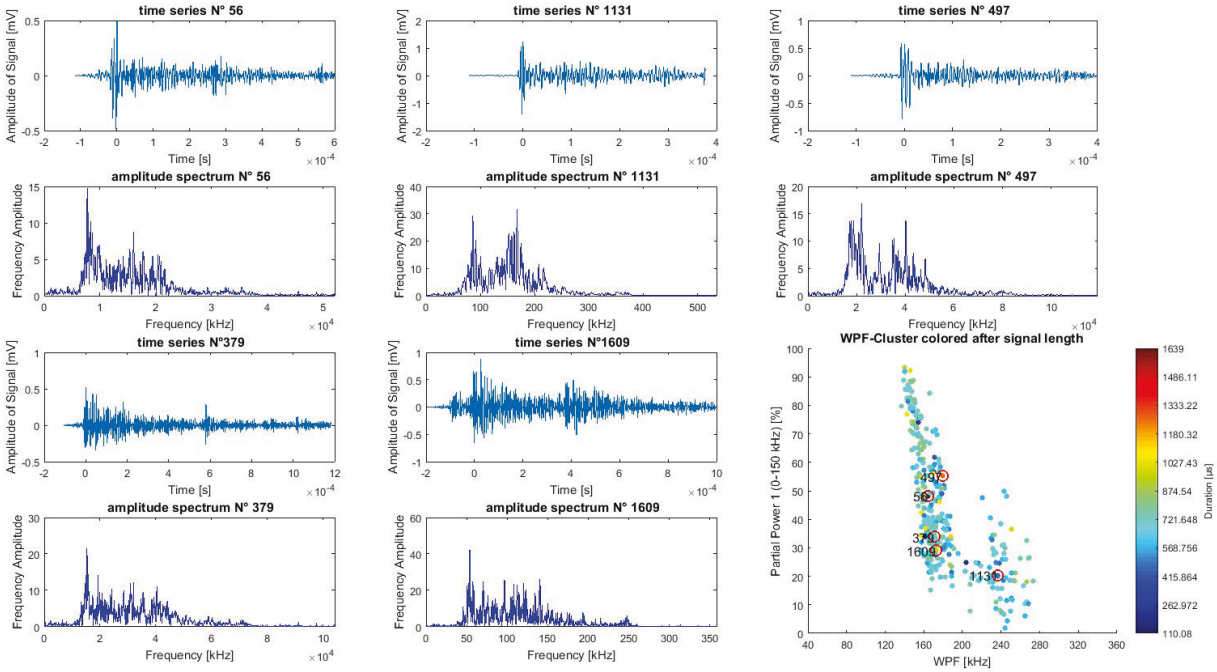


Abbildung 4.7-22 korrigierte Zeitreihen und Frequenzspektren der fünf längsten Signale; Clusterdarstellung mit farbkodierter Signallänge für eine Fensterlänge von Ueff = 255

Im Vergleich zu den Darstellungen davor sieht man, dass eine nicht zu vernachlässigende Anzahl an Schallemissionspunkten entfernt wurde. Vor allem aus Cluster zwei in einem Bereich von 70% bis 100% der partiellen Leistung mit einer gewichteten Vorzugsfrequenz von 170 kHz bis 190 kHz war eine große Ansammlung dieser nachträglich entfernten Schallemissionspunkte. Cluster eins verliert durch die Korrektur ebenfalls einige Schallemissionspunkte im oberen Bereich des Leistungsbandes, wohingegen das dritte Cluster kaum davon betroffen ist. Das Signalmaximum bezogen auf die Anzahl befindet sich nun zwischen 600µs und 1100µs. Die Zeitreihe N°56 ist in allen drei Abbildungen enthalten und deshalb kann man mit ihr die Veränderung durch die nachgeschaltete Datenverarbeitung in der Clusterausbildung sehr gut nachvollziehen. Mit einem ungekürzten Effektivwert von Ueff = 1043 beinhaltet die Zeitreihe N°56 8 bis 9 Mehrfach-und oder Reflexionseinsätze. Einen Mehrfacheinsatz weist der Datensatz nach der Neuberechnung mit einem deutlich kleineren Effektivwert von Ueff = 255 Samples auf. Wohingegen in Abbildung 4.7-22 nach erneuter Korrektur ausschließlich die Signale dargestellt sind, bei denen keine Mehrfacheinsätze erfasst wurden und so das eigentliche Signal der Schallemission dargestellt ist.

In Abbildung 4.7-23 werden die Cluster ausgewertet eingefärbt, und nach der Amplitude, der Anstiegszeit, der Energie und der Signallänge miteinander verglichen.

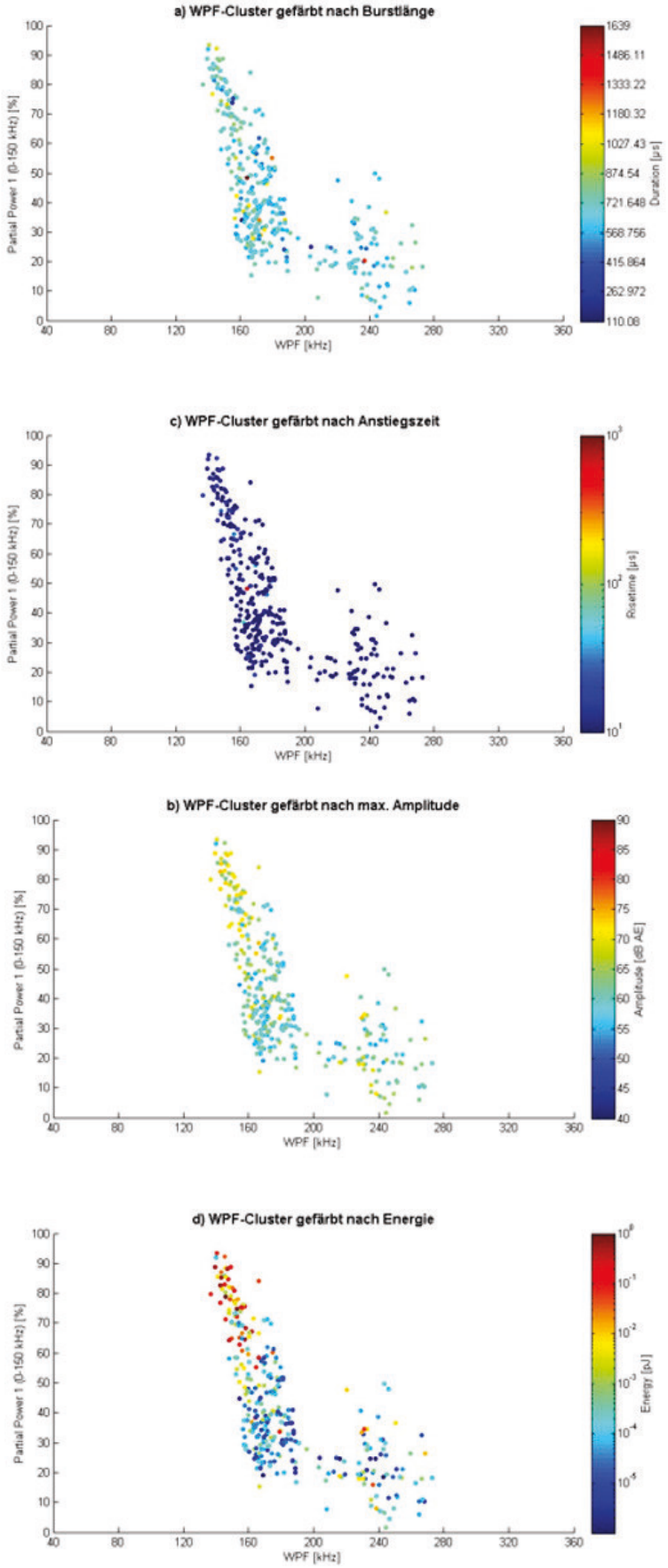
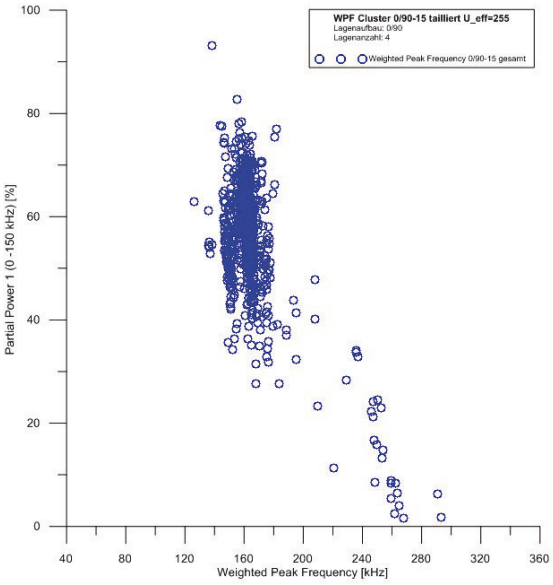


Abbildung 4.7-23 Vergleich der Clusterabbildungen farblich kodiert nach den einzelnen Parametern für den Effektivwert Ueff = 255

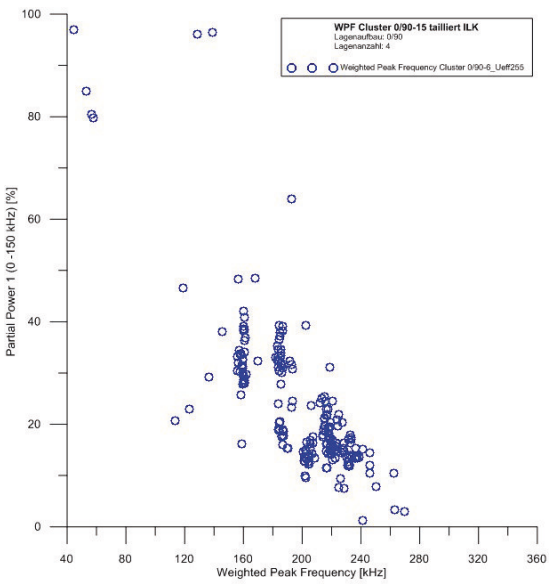
Anhand dieser Abbildung wird deutlich, dass ausschließlich das erste Cluster Anteile im partiellen Leistungsbereich von 80% und 100% enthält. Eine finale Zuordnung der Schallemissionssignale zu verschiedenen Schädigungsmechanismen kann aufgrund der einzelnen maximalen Amplituden immer noch nicht erfolgen, da sich die minimalen und maximalen Werte in allen Clustern wiederfinden und nicht auf ein bestimmtes Cluster limitiert sind. Analog verhält es sich bei der Darstellung der Energiewerte. Vergleicht man die Ergebnisse der Abbildung 4.8-1d) und Abbildung 4.7-15, so erkennt man, dass die Daten ebenfalls über sechs Dekaden verteilt sind, es aber eine starke Abstufung zwischen den Werten in einem geringeren Leistungsbereich (bis ca. 60%) und den Werten im höheren Leistungsbereich gibt. Bei den Darstellungen hinsichtlich der Anstiegszeiten in Abbildung 4.7-16 und Abbildung 4.8-1c), müssen zuerst die farblichen Kodierungen einheitlich gewählt werden, um die Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Die so aufgearbeiteten Daten zeigen lediglich Zeitreihen mit kurzen Anstiegszeiten (blaue Farbkodierung der Schallemissionsereignisse). Annähernd alle Schallemissionssignale mit mittlerer und langer Anstiegszeit wurden durch die korrigierende Nachbearbeitung der Daten eliminiert. Somit konnte die Signallänge als essentielle Größe zur Beurteilung der ausgebildeten Schädigungscluster identifiziert werden. Die Signallänge muss folglich für Datenbearbeitung bei weiterführende Untersuchungen mit der Clusterdarstellung der unterschiedlichen Schädigungsbereiche berücksichtigt werden, da sich durch fehlerhafte Signalfrequenzen und Signalenergien Scheincluster bilden können.

4.8 Ergebnisvergleich Vorversuche zu in-situ-Versuche

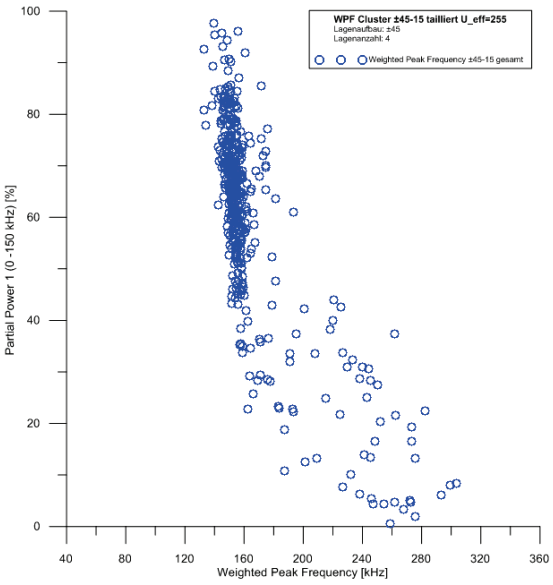
Wie aus der Ergebnisdiskussion der bisherigen Versuchsergebnisse ersichtlich ist, bilden sich die Cluster in unterschiedlichen Bereichen der partiellen Leistung. Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen Schallemissionsereignisse im WPF-PP-Plot mit einer partiellen Leistung 1 von bis zu 90%. Bei den Ergebnissen der in-situ-Versuche hingegen wird ein Wert von 60% der partiellen Leistung 1 kaum überschritten. Die unterschiedliche Verteilung der Schallemissionsereignisse im WPF-PP-Plot ist in nachfolgender Abbildung 4.8-1 vergleichend dargestellt.



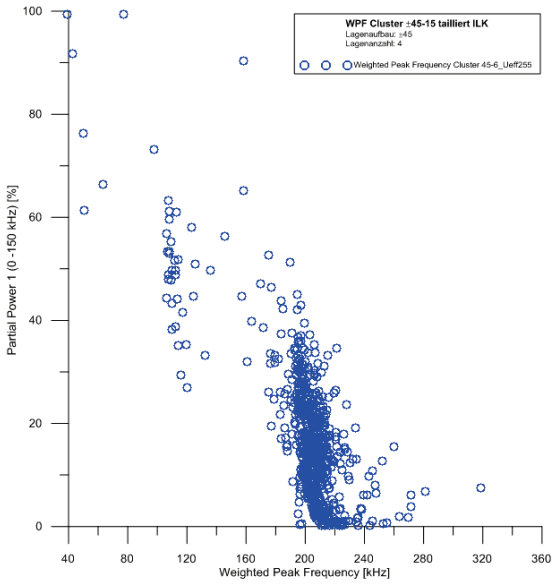
a) Clusterdarstellung von Vorversuchen 0/90°-15-1 bis 0/90°-15-5



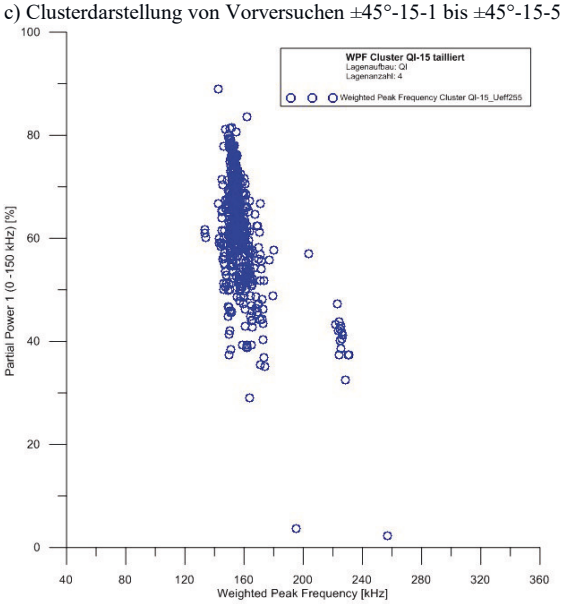
b) Clusterdarstellung von in-situ Versuchen 0/90°-15-6 bis 0/90°-15-7



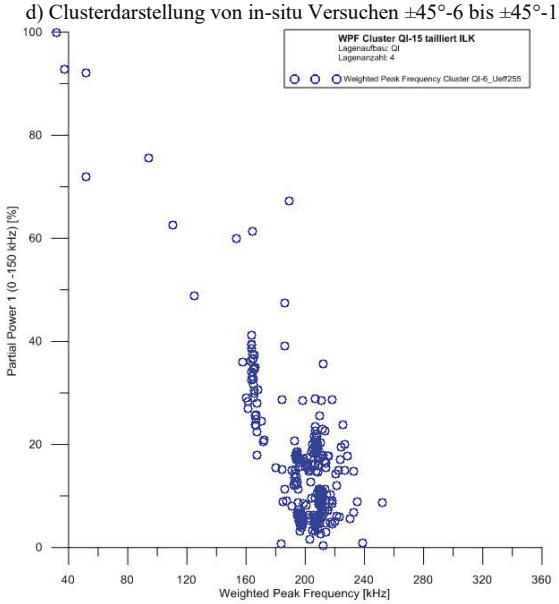
c) Clusterdarstellung von Vorversuchen ±45°-15-1 bis ±45°-15-5



d) Clusterdarstellung von in-situ Versuchen ±45°-6 bis ±45°-15-7



e) Clusterdarstellung von Vorversuchen QI-15-1 bis 0/90°-15-5



f) Clusterdarstellung von in-situ Versuchen QI-15-6 bis 0/90°-15-7

Abbildung 4.8-1 Vergleichende Darstellung der Ergebnisse im WPF-PP-Plot der Vorversuche und der in-situ-Versuche bei einem Effektivwert von Ueff = 255 Samples

Gemäß den Erkenntnissen bezüglich des Einflusses der Länge des Effektivwertfensters auf die Berechnung der Schallemissionsparameter aus dem Kapitel 4.7.2, wurden die Daten der Vorversuche mit einem Effektivwertfenster von $U_{eff} = 255$ Samples neu ausgewertet. Deshalb können die dargestellten Cluster im Vergleich zu zuvor gezeigten Abbildungen der Proben variieren. Interessanterweise zeigen die Ergebnisse der Vorversuche und in-situ-Versuche bei den Proben mit den 0/90° und QI Lagenaufbauten für die Verteilung der Cluster über die gewichtete Vorzugsfrequenz eine ähnliche Verteilung über den Frequenzbereich (Abbildung 4.8-1a, b, e, f). Das erste Cluster für matrixdominierende Schädigungsmechanismen ist in Abbildung 4.8-1a und Abbildung 4.8-1b jeweils bei eine gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 160 kHz zu finden. Bei den in-situ-Versuchen für den 0/90° Lagenaufbau grenzt sich jedoch das zweite Cluster deutlich besser vom ersten ab und liegt bei einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 190 kHz. Bei den Vorversuchen gab es hingegen zwischen Cluster

eins und zwei Überlagerungen. Eine starke Ausprägung weist das dritte Cluster der 0/90° Proben und QI-Proben bei den in-situ Versuchen auf.

Die Proben mit den ±45-Lagenaufbauten zeigen hinsichtlich der Clusterbildung starke Unterschiede. Bei den Vorversuchen bildet sich Cluster eins beispielsweise bei ca. 160 kHz und darüber hinaus ist keine weitere Clusterbildung erkennbar. Bei den Darstellungen der Ergebnisse der in-situ geprüften Proben sind zwei gut getrennte Cluster ausgebildet, allerdings liegen die Cluster in anderen Frequenzbereichen der gewichteten Vorzugsfrequenz als bei den Vorversuchen. Cluster eins liegt im Bereich der partiellen Leistung von 30% bis 70 % und einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 120 kHz (Abbildung 4.8-1d). Cluster zwei zieht sich über einen niedrigeren Bereich der partiellen Leistung von bis zu 50% und einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 190 kHz bis 280 kHz. In Abbildung 4.8-1b, d und f sind einzelne Schallemissionssignale mit annähernd 100% partieller Leistung 1 zu erkennen. Die gewichtete Vorzugsfrequenz bei diesen Signalen befindet sich in einem Bereich von etwa 40 kHz bis 100 kHz. Zur Bestimmung der Herkunft dieser Signalanteile wurde wiederum der zeitliche Verlauf der Clusterbildung je Versuch näher untersucht und in Abbildung 4.8-2 dargestellt. Die zeitliche Auflösung der Schallemissionssignale macht ersichtlich, dass diejenigen mit geringeren gewichteten Vorzugsfrequenzen hauptsächlich gegen Ende der Versuchsdurchführung auftreten. Dazu kommt die Aufzeichnung von einigen Schallemissionssignalen während des Versagens der Probe, die ihren Ursprung sehr wahrscheinlich in „ruckhaften“ Relativbewegungen in der Sensorhalterung haben und deshalb aus der Clusterdarstellung entfernt werden müssen.

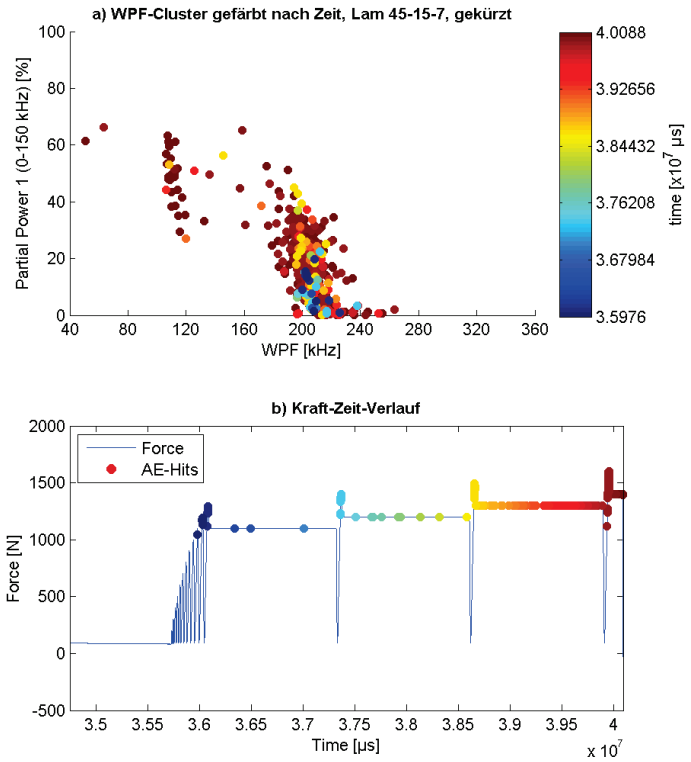
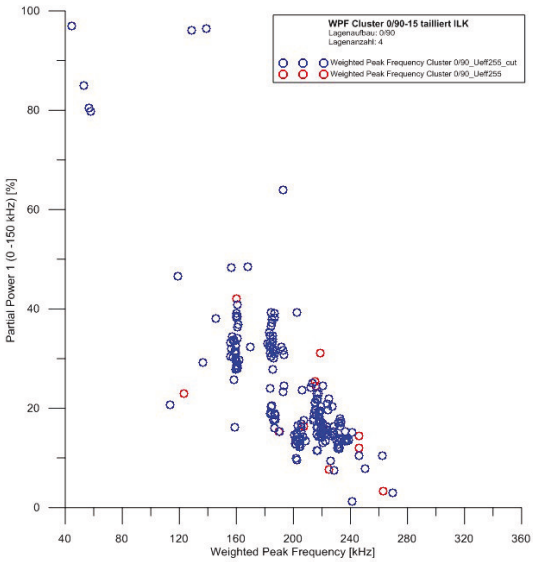
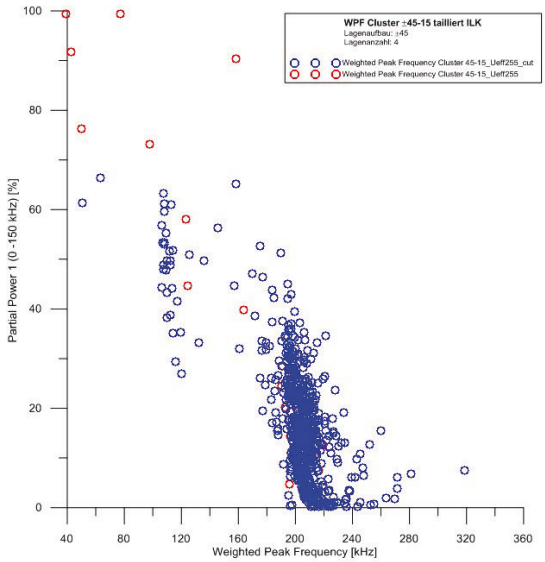


Abbildung 4.8-2 Clusterverteilung der Probe 45-15-7 und Kraftverlauf während der in-situ-Messung, zeitliche Auflösung der Schallemissionssignale und farblich Kodierung des Versuches ohne Probenversagen

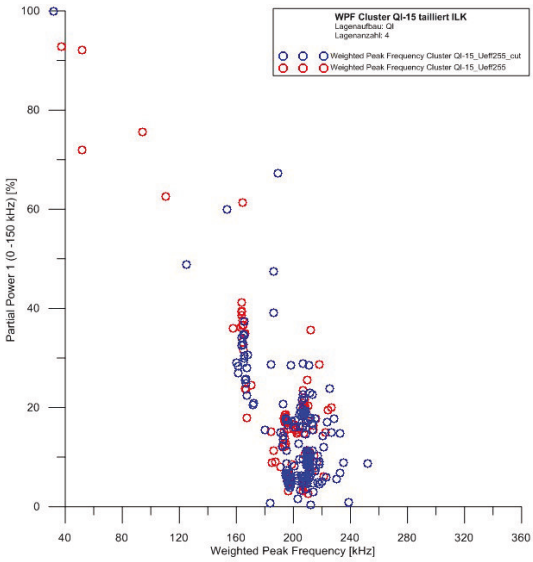
In Abbildung 4.8-2 wurden die Signale, welche beim Versagen derselben Probe erfasst wurden, entfernt. Dies erfolgte durch ein Eliminieren der Signale in der letzten Lastrampe, die 220 N unter dem absoluten Kraftmaximum gemessen wurden. Die Datenverringerung wirkt sich gleichermaßen auf die Clusterbildung aus. In Abbildung 5.14a sind folglich die Schallemissionen mit hoher partieller Leistung 1 und niedriger, gewichteter Vorzugsfrequenz verschwunden. Anhand des an Probe 45-15-7 erläuterten Verfahrens wurden sämtliche Proben dieser Versuchsreihe erneut ausgewertet und die Ergebnisse der Neuauswertung zeigten nahezu dieselben Ergebnisse. In Abbildung 4.8-3a bis Abbildung 4.8-3c werden die Auswirkungen auf die Clusterbildung je nach Lagenaufbau deutlich. Hier sind die Schallemissionen, die während oder nach dem Probenversagen auftreten, rot markiert. Man kann die roten Schallemissionen in diesen Darstellungen als ungültig bezeichnen, weshalb sie nicht zur Interpretation der Ergebnisse herangezogen werden sollten.



a) 0/90◦-Proben



b) ±45°-Proben



c) QI-Proben

Abbildung 4.8-3 Clusterdarstellungen mit Signalen während des Probenversagens (rot) und ohne (blau)

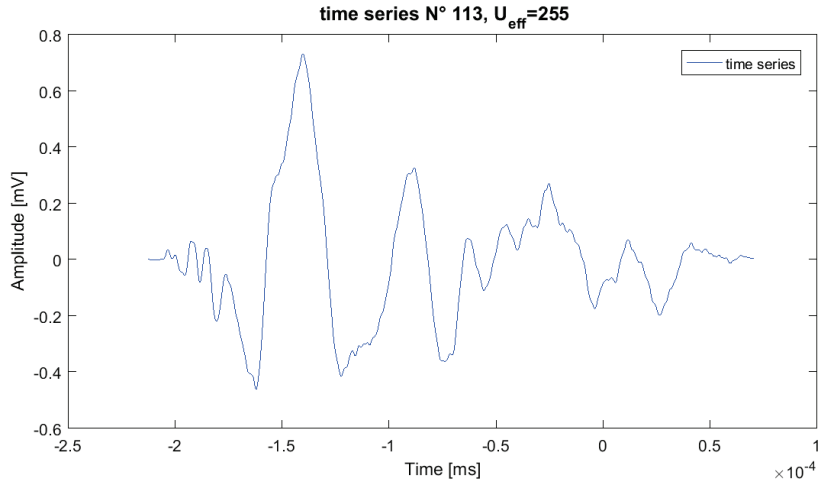


Abbildung 4.8-4 Darstellung der Zeitreihe N◦113 der Probe QI-15-6 mit Effektivwert von Ueff = 255 Samples

Bei den Proben mit den ±45° und quasiisotropen Lagenaufbauten ist eindeutig zu erkennen, dass alle Signale oberhalb einer partiellen Leistung von 70% als Störsignale identifiziert wurden. Die Häufung der Störsignale bei den QI-Proben ist darauf zurückzuführen, dass bei der letzten Haltezeit während der CT-Aufnahme und dem Versagen der Probe eine Vielzahl an Schallemissionssignalen erfasst wurde. Die Proben mit 0/90° Lagenaufbau weisen Ergebnisse in ähnlichen Bereichen der partiellen Leistung und der gewichteten Vorzugsfrequenz auf und sind in Abbildung 4.8-3a dargestellt. Darüber hinaus befinden sich in diesen Bereichen wenig Störsignale, was den Rückschluss zulässt, dass die Einzelsignale bei den quasiisotropen Proben und bei den 0/90° Proben auf dieselben Schädigungsmechanismen zurückzuführen sind. Für eine genauere Zuordnung dieser Signale zu den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen wurde exemplarisch für alle Signale anhand der Signale mit hohen partiellen Leistungen und in den Bereichen der niedrigen, gewichteten Vorzugsfrequenzen die Zeitreihe Nr. 113 der quasiisotropen Probe QI-15-6 in Abbildung 4.8-4 dargestellt, die mit den Schallemissionen in Abbildung 4.8-3c bei 100% der partiellen Leistung korrespondiert. Es fällt auf, dass das Signal auffallend kurz ist und unmittelbar nach dem Signalmaximum endet. Für ein besseres Verständnis der Signalcharakteristik wurde die Zeit-Frequenz-Verteilung genauer untersucht. Hierzu wurde eine Wavelet-Transformation (WT) des Signals durchgeführt, die der Fourier-Transformation wegen der Möglichkeit, zeitlich lokalisierte Wellen (Wavelets) als Basis der Transformation nutzen zu können, vorgezogen. Als Ziel ist hier eine bestmögliche Frequenz-Zeit-Auflösung anzustreben.

Nach der Transformation ist zu erkennen, dass das Signal überwiegend aus niedrigen Frequenzanteilen zusammengesetzt ist (Abbildung 4.8-5). Somit erklärt sich auch die verhältnismäßig geringe, gewichtete Vorzugsfrequenz, da die Maxima zwischen 170 µs und 200 µs unter 50 kHz liegen. Der weiterführende Zeitverlauf zeigt, dass annähernd alle enthaltenen Frequenzen unter 150 kHz liegen und deshalb die Signale fast bei 100% des partiellen Leistungsbandes 1 liegen. Diese niederfrequente Signalcharakteristik kann auf Rissbildungen und Relativbewegungen zwischen den einzelnen Lagen des Laminates hindeuten und wird im nächsten Kapitel durch CT-Untersuchungen dieser Proben genauer untersucht.

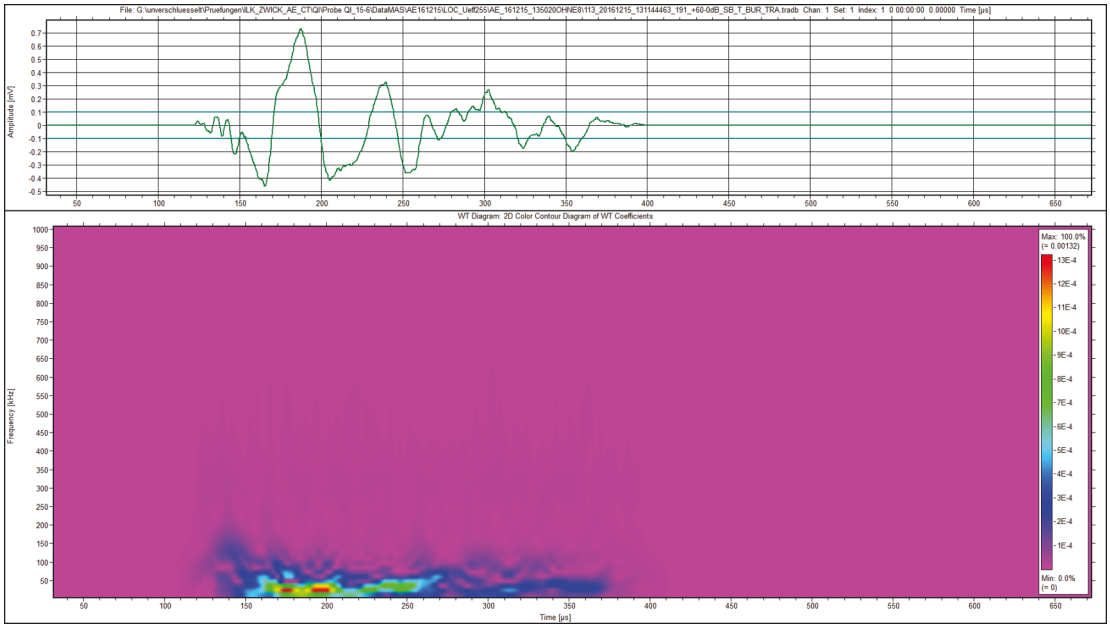
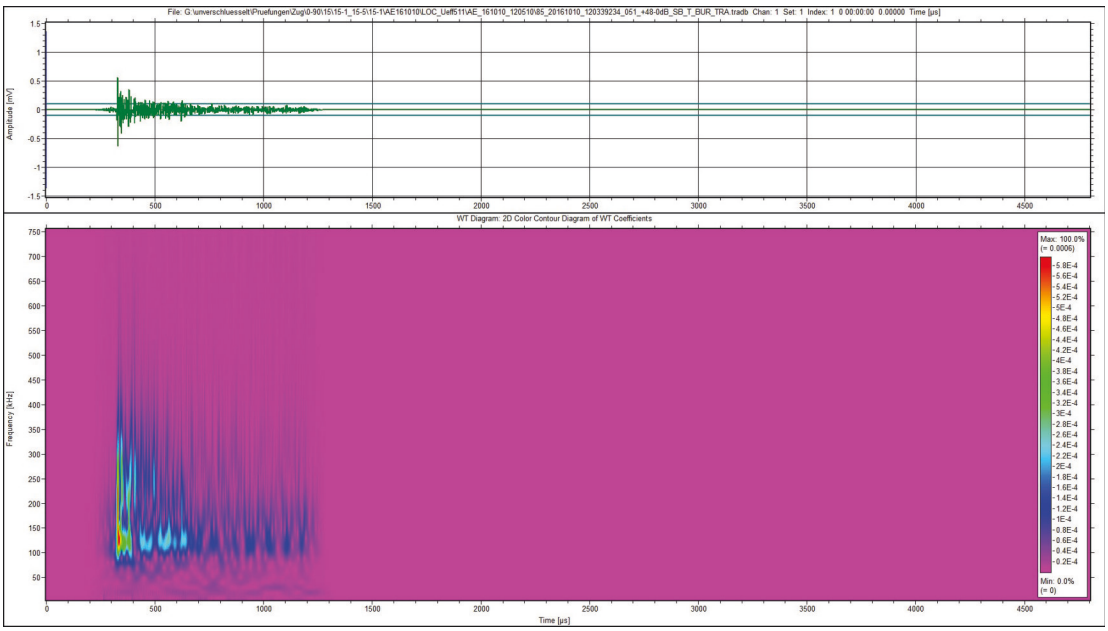
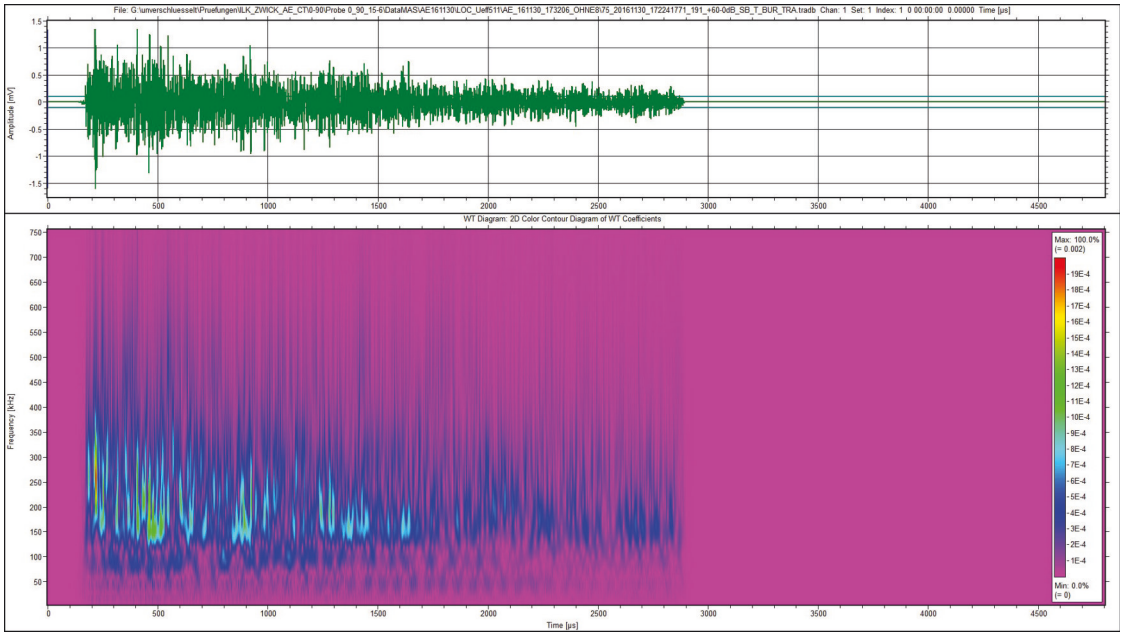


Abbildung 4.8-5 Zeitreihe mit 2D-Wavelet-Transformation des Signals N◦113 der Probe QI-15-6

Nachfolgend wird mit der Zeit-Frequenz-Analyse durch die Wavelet-Transformation die Clusterbildung der Vorversuche und die der in-situ-Versuche detailliert betrachtet. Es soll herausgearbeitet werden, warum die Proben, die aus demselben Ausgangsmaterial und der gleichen Fertigungscharge geschnitten wurden, hinsichtlich der Clusterausbildung im Bereich der partiellen Leistung so starke Unterschiede aufweisen. Die Darstellungen der Versuchsergebnisse im WPF-PP-Plot der in-situ-Versuche zeigen, wie bereits in vorangegangenen Kapiteln diskutiert, im Allgemeinen niedrigere Werte im Leistungsband der partiellen Leistung 1, was mit höheren Frequenzen in der zeitlichen Verteilung zusammenhängen sollte. Dies ist eventuell auf eine höhere Tiefpasswirkung der Spannbacken und eine andere Applikation der Sensoren bei den Vorversuchen zurückzuführen. In Abbildung 4.8-6 sind mit der Wavelet-Transformation zwei Zeitreihen von 0/90° Proben vom ersten Cluster (≈ 160 kHz der gewichteten Vorzugsfrequenz) vergleichend dargestellt.



a) 0/90-15-1-T geprüfte Probe aus Vorversuchen, Sensoren auf Spannbacken

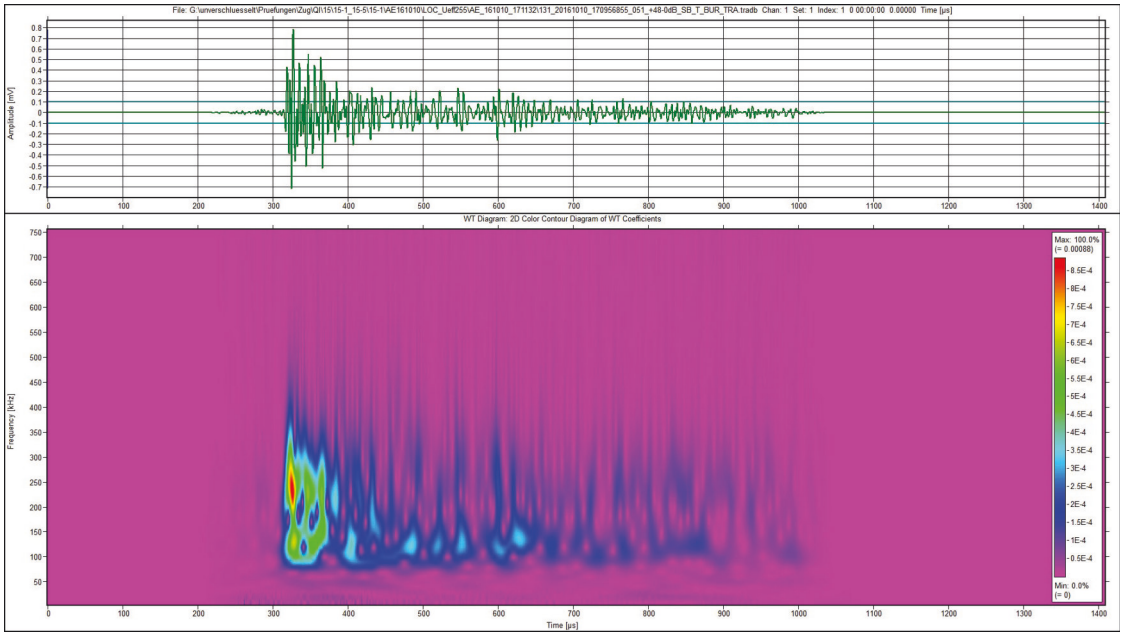


b) 0/90-15-6-T geprüfte Probe der in-situ-Versuche, Sensoren in-plane auf Spannbacken

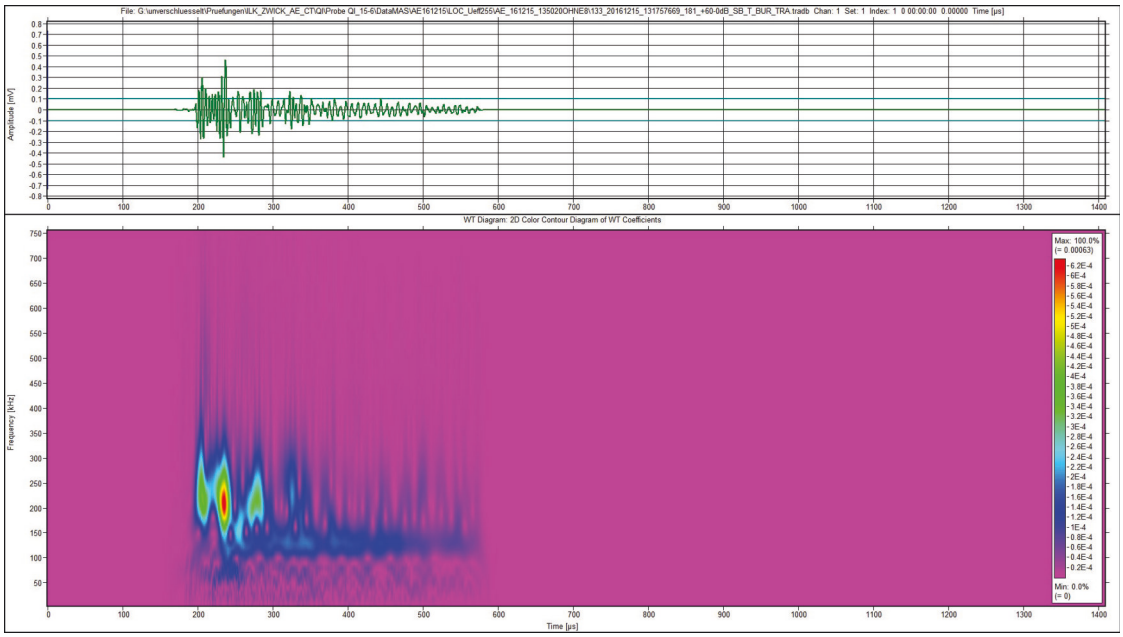
Abbildung 4.8-6 Zeitreihe mit Wavelet-Transformation für zwei Signale aus dem gleichen Frequenzbereich von Proben mit einem 0/90° Lagenaufbau

Bei beiden Versuchskonfigurationen waren die Sensoren auf den Spannbacken appliziert. Trotz alledem kann man essentielle Unterschiede im Frequenz- und Zeitbereich erkennen. Die Signale der Vorversuche und die der in-situ-Versuche wurden mit einem Effektivwertfenster von U_{eff} = 511 Samples berechnet. In Abbildung 4.8-6b sieht man jedoch, dass das Signal, welches bei den in-situ-Versuchen gemessen wurde, deutlich länger ist als das, was bei den Vorversuchen gemessen wurde (Abbildung 4.8-6a). Darüber hinaus ist die maximale Amplitude des Signals von den in-situ-Versuchen ungefähr doppelt so groß. Bei den Vorversuchen liegt das Maximum der Zeit-Frequenz-Verteilung bei ca. 140 kHz und es sind im gesamten Verlauf noch drei weitere Maxima zu erkennen, die mit einer hellblauen Farbe kodiert und sehr wahrscheinlich durch Reflexionen am Probenrand entstanden sind. Das Maximum bei den in-situ-Versuchen ist in dieser Darstellung bei 260 kHz und es gibt gleichermaßen über den Zeitverlauf mehrere Reflexionen, bei denen die Frequenzen im Schnitt um 45 kHz höher sind als bei den Vorversuchen. Bei den quasiisotropen Proben hingegen sind die in Abbildung 4.8-7 dargestellten Zeit-Frequenz-Verteilungen vergleichbar. Dies liegt hauptsächlich an der geänderten Sensorapplikation bei den in-situ-Versuchen, weg von der Applikation auf den Spannbacken direkt zu einer Applikation auf der Probe.

Aus der Zeit-Frequenz-Verteilung geht eine deutlich bessere Vergleichbarkeit hervor als bei den 0/90° Proben. So ist eine geringfügig höhere maximale Amplitude bei den Vorversuchen erkennbar. Auch die Zeit-Frequenz-Verteilung liegt bei einem ähnlichen Bereich von ca. 200 kHz bis 250 kHz. Zusätzlich sind beim Signal der Vorversuche stärker ausgeprägte niederfrequente Mehrfachreflexionen zu erkennen. Dies führt zu einem höheren Anteil in der partiellen Leistung 1, wodurch das Cluster im ersten Leistungsband nach oben wandert. Da für HSU-Nielsen-Quellen-Signale konstant reproduzierbare Frequenzverteilungen erwartet werden können, wurden für nachfolgenden Darstellungen die jeweiligen HSU-Nielsen-Signale abgebildet.



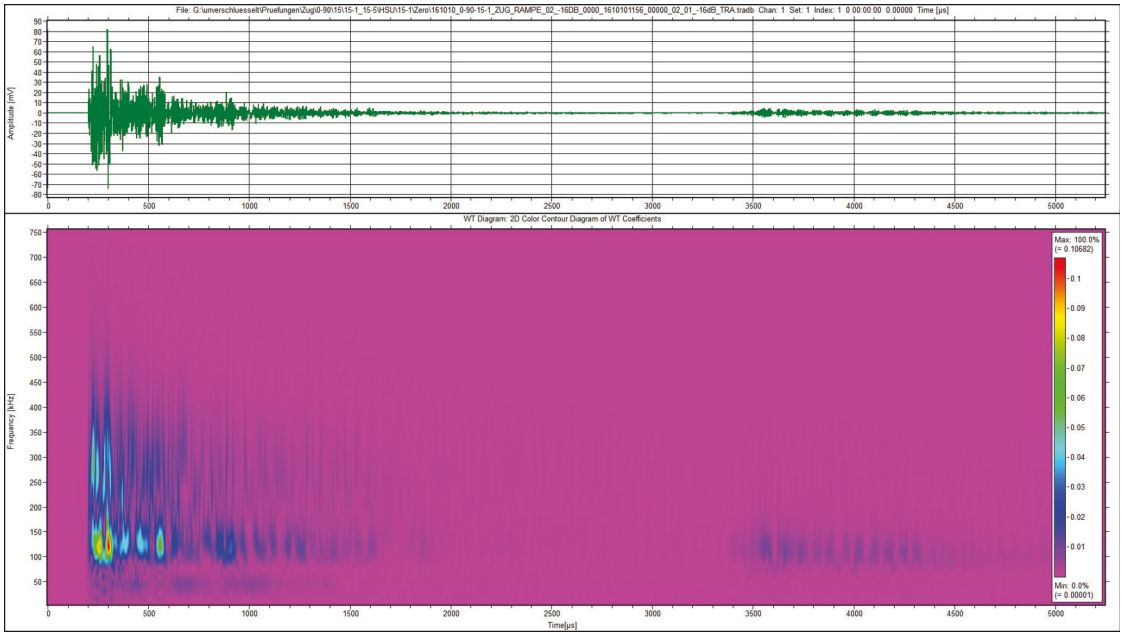
a) QI-15-1-T geprüfte Probe aus Vorversuchen, Sensoren auf Spannbacken



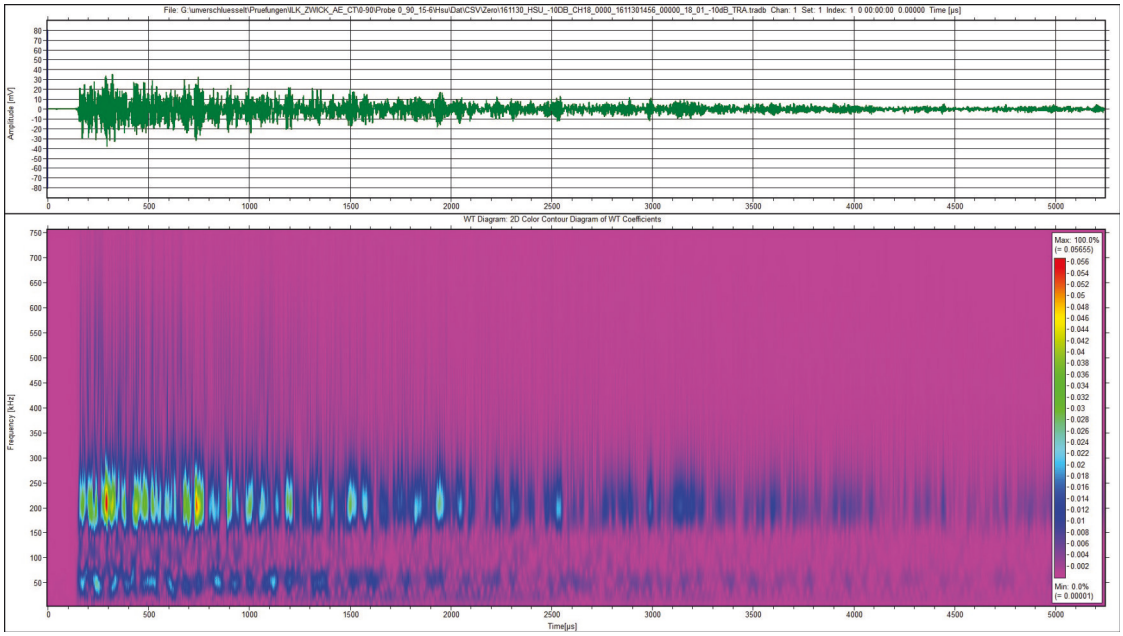
b) QI-15-6-T geprüfte Probe der in-situ-Versuche, Sensoren auf der Probe

Abbildung 4.8-7 Zeitreihe mit Wavelet-Transformation für zwei Signale aus dem gleichen Frequenzbereich von Proben mit quasiisotropem Lagenaufbau

Die kompletten Versuchsrandbedingungen und Versuchskonfigurationen waren sowohl bei den Vorversuchen, als auch bei den in-situ-Versuchen dieselben und folglich kommt der Sensorapplikation bei den Versuchsreihen eine entscheidende Rolle zu. In Abbildung 4.8-8 sind die unterschiedlich langen Signale und die unterschiedlichen maximalen Amplituden auffällig. Es wurden zwar verschiedene Verstärkungen gewählt, allerdings hat dies auf die Frequenzverteilung keinen Einfluss.



a) 0/90-15-1-T geprüfte Probe aus Vorversuchen, Sensoren auf Spannbacken

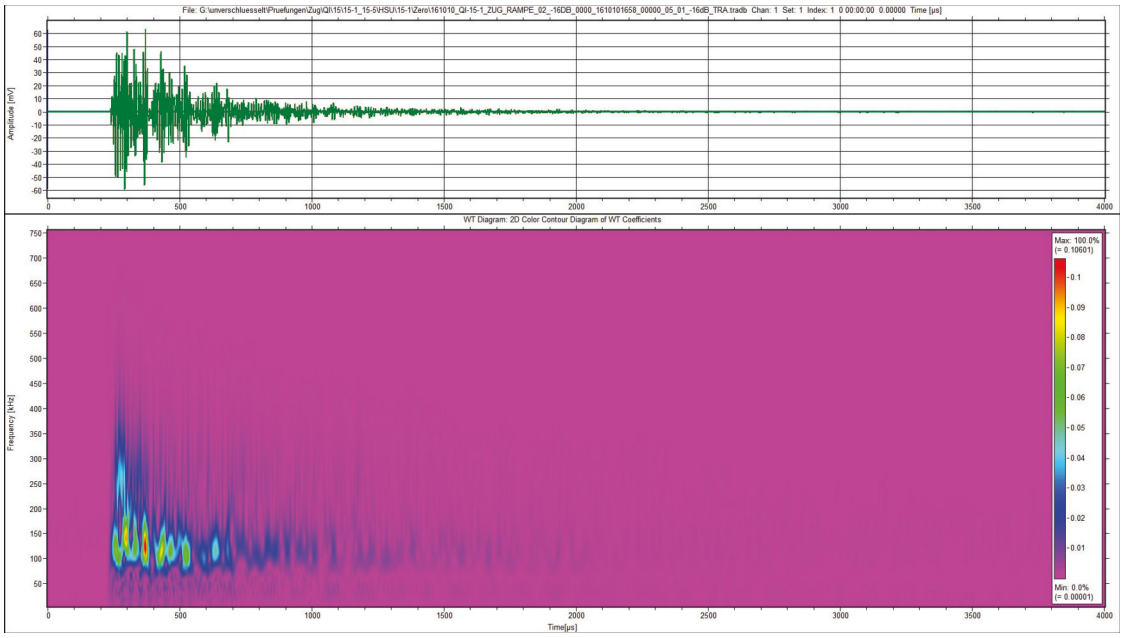


b) 0/90-15-6-T geprüfte Probe der in-situ-Versuche, Sensoren in-plane auf Spannbacken

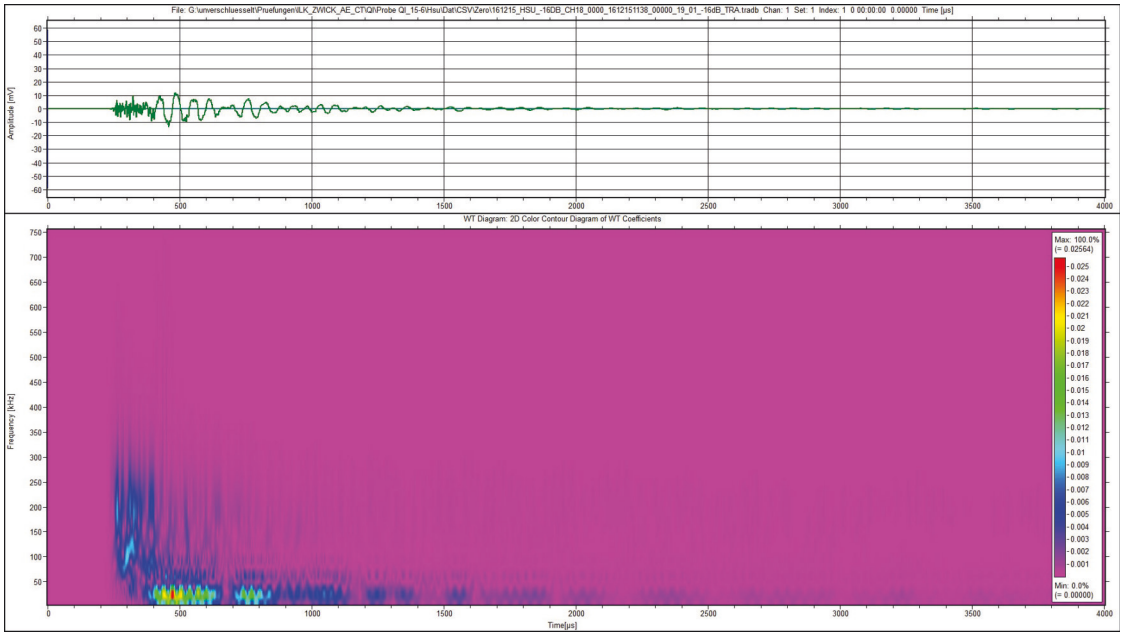
Abbildung 4.8-8 Zeitreihe mit Wavelet-Transformation für zwei HSU-Nielsen-Signale an einer Probe mit 0/90◦-Lagenaufbau

Das HSU-Nielsen-Signal aus dem Vorversuch (Abbildung 4.8-8a) besitzt wenige Mehrfachreflexionen und hat sein Maximum bei ca. 130 kHz. Jedoch hat es nach zwischenzeitlichem Abklingen bei ca. 3500 µs einen erneuten Reflexionseinsatz. Ein Großteil der Frequenzanteile liegt hier, wie bei den meisten Signalen der Vorversuche, zwischen 100 kHz und 150 kHz. Auffällig ist, dass bei den Zeit-Frequenz-Verteilungen der HSU-Nielsen-Signalen der in-situ-Versuche in diesem Bereich kaum Frequenzanteile (Abbildung 4.8-8b) zu finden sind. Das Signal der in-situ-Versuche hat eine größere Anzahl an Reflexionseinsätzen und weist ein schmales Frequenzband im niederfrequenten Bereich auf. Vergleicht man Abbildung 4.8-8a mit Abbildung 4.8-8b in diesem Bereich wird deutlich, dass bei den in-situ-

Versuchen zwischen 10 kHz und 50 kHz Maxima mit vergleichbar hohen Wavelet-Koeffizienten wie bei den Reflexionseinsätzen bei höheren Frequenzen, beispielsweise bei 220 kHz, enthalten. Auch hier kann die unterschiedliche Sensorapplikation ursächlich sein, bei der die Sensoren bei den in-situ-Versuchen der 0/90° Proben auf den Spannbacken um 90° versetzt zur Probe ausgerichtet waren. Wie bereits erwähnt waren die Sensoren bei den in-situ-Versuchen an den quasiisotrop aufgebauten Proben direkt an den Proben angebracht, was jedoch die Sensorik nach Anregung mittels HSU-Nielsen-Signal zu einem ausgeprägten Übersteuern brachte. Um den Übersteuerungseffekt so klein als möglich zu halten, wurden in nachfolgender Abbildung 4.8-91 die Signale dargestellt, die am entgegengesetzten Ende des Prüflings aufgenommen wurden. Trotz alledem sieht man in Abbildung 4.8-9b den übersteuerten hochfrequenten Signalanteil. Danach erkennt man im Signalverlauf hauptsächlich niederfrequente Signalanteile bis 50 kHz, wie sie auch in Abbildung 4.8-8b zu finden sind. Der Frequenzverlauf der Probe aus den Vorversuchen weist fast keine Signalanteile in diesem Bereich auf und ist ebenfalls ähnlich zu dem in Abbildung 4.8-8a mit den Maxima zwischen 100 kHz und 150 kHz. Es ist naheliegend, dass die Signale aus den Vorversuchen einer aufspannungsbedingten Frequenzfilterung unterlegen sind, die beim Durchlaufen der Welle von der Probe durch die Spannbacke bis zum Sensor erfolgt ist. Die Spannbacke filtert gemäß dieser Theorie die hohen Frequenzanteile des Signals und verschiebt dadurch den Bereich der partiellen Leistung 1 der Signale im WPF-PP-Plot zu höheren Werten. Folglich dominiert in diesen Signalen der niederfrequente Anteil in den Signalen. Die Spannbacken bei den in-situ-Versuchen haben eine geringere filternde Wirkung, wobei hier die Position und Ausrichtung der Sensoren in einer Ebene auf der Probe einen größeren Einfluss aufweisen, wodurch symmetrische Wellenmoden mit höherfrequenten Signalanteilen besser detektiert werden können. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verschiebung im Leistungsbereich bei den Vorversuchen im WPF-PP-Plot mit den Filtereffekten in den Spannbacken zu begründen ist und die Sensorausrichtung bei den in-situ-Versuchen diese Effekte überlagern.



a) QI-15-1-T geprüfte Probe aus Vorversuchen, Sensoren auf Spannbacken



b) QI-15-6-T geprüfte Probe der in-situ-Versuche, Sensoren auf Probe

Abbildung 4.8-9 Zeitreihe mit Wavelet-Transformation für zwei HSU-Nielsen-Signale an einer Probe mit quasiisotropem Lagenaufbau

4.9 Schallemissionsergebnisse in Korrelation der CT-Aufnahmen

Um final den unterschiedlichen Schallemissionsclustern in der WPF-PP-Darstellung die verschiedenen Schädigungsmechanismen zuordnen zu können und mit der aus der Literatur bekannten Zuordnung abzugleichen, wurden die CT-Aufnahmen der in-situ-Versuche mit den Schallemissionssignalen verglichen. Die im Kapitel 4.7.1 In-situ-Messung Schallemission und CT dargestellten Aufnahmen weisen teilweise Bildrauschen auf, das auf fehlerhaft konfigurierte Detektorelemente zurückzuführen ist. Um die bildbeeinträchtigenden Rauschanteile zu entfernen, wurden verschiedene Filteroperationen bei der Bildbearbeitung durchgeführt, die nachfolgend kurz erläutert werden. Dabei wird das Originalbild in seine Frequenzanteile zerlegt und in ein nieder- und hochfrequentes Bild durch eine „Finite Impulse Response“-Filterung (FIR-Filterung) umgewandelt (Abbildung 4.9-1). Die sogenannten FIR-Filter sind nicht-rekursive Filter, die sich durch eine endliche Impulsantwort auszeichnen.

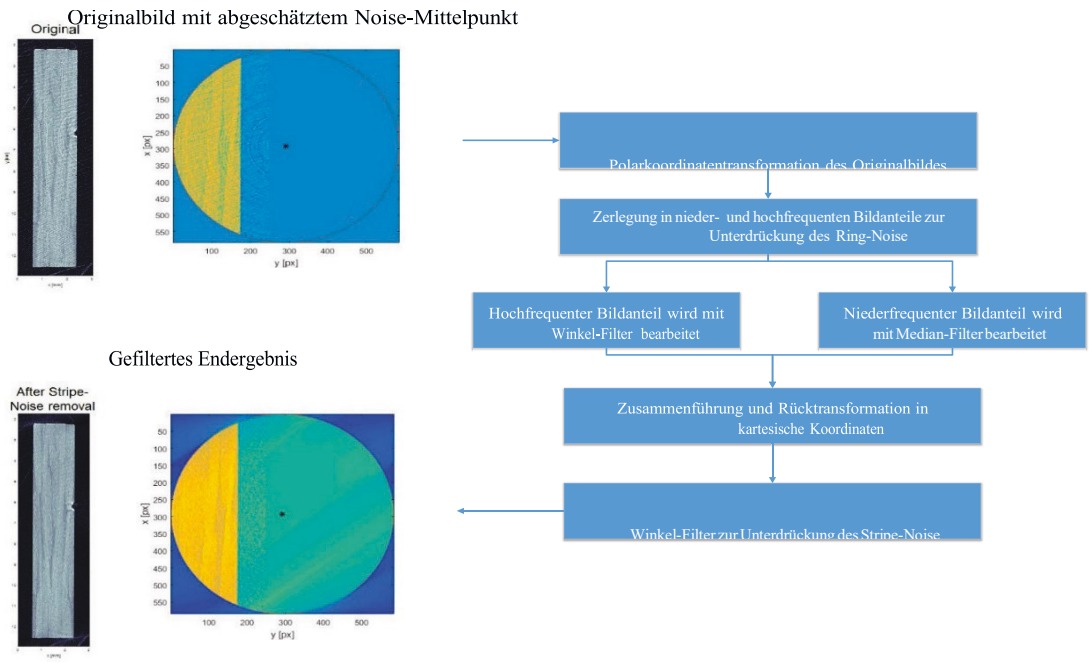


Abbildung 4.9-1 Schematische Darstellung der Bildbearbeitung und Filterung [45]

Beim verrauschten Ausgangsbild wurde somit durch einen Tiefpassfilter die niederfrequenten Bildanteile und mit einem Hochpassfilter die hochfrequenten Anteile separiert, was in Abbildung 4.9-2 exemplarisch dargestellt ist. Nach der Separierung dieser Anteile wurde durch das Anwenden eines Medianfilters auf den niederfrequenten Anteil, einem Pixelwert, ein Medianwert aus seinen umgebenden Nachbarpixeln zugewiesen [52]. Der Originalwert wird dabei nicht zur Berechnung des Medianwertes verwendet und der Bereich, der die Anzahl der Nachbarpixel festlegt, verläuft waagerecht längs der Einzelpixel und hebt die Störanteile aus den jeweiligen Bildbereichen an. Dadurch wird ein geglättetes Bild erzeugt, bei dem die Streifen in einem Bereich liegen, der nicht relevant für die CT-Aufnahme ist (Abbildung 4.9-3). Der hochfrequente Bildanteil wird mit einem Notch-Filter (Winkelfilter) bearbeitet, der sämtliche Frequenzen eliminiert, die senkrecht zum Bildmittelpunkt stehen. Danach werden beide Bildanteile zusammengefügt, wie in Abbildung 4.9-3 zu sehen ist. Im Vergleich mit der Darstellung in Abbildung 4.9-1 ist eine deutliche Verbesserung der Bildqualität ersichtlich. Der Ring-Noise ist entfernt und das Bild enthält nur noch den Stripe-Noise, der mit demselben Verfahren wie die hochfrequenten Anteile gearbeitet wird. Der Strip-Noise verläuft immer im selben Winkel über das Bild (ca. bei 60°), sodass ein symmetrischer Notch-Filter in eben diesem Winkelbereich angewendet wird, der die Bildstörungen ausblendet. Diese Art der Bildbearbeitung wurde auf sämtliche Aufnahmen der bei den in-situ-Versuchen geprüften Proben verwendet. Es stellte sich heraus, dass selbst bei den unbelasteten Proben im Ausgangszustand bereits Fehlstellen vorhanden waren, die vor der Bildbearbeitung von Störungen verdeckt wurden.

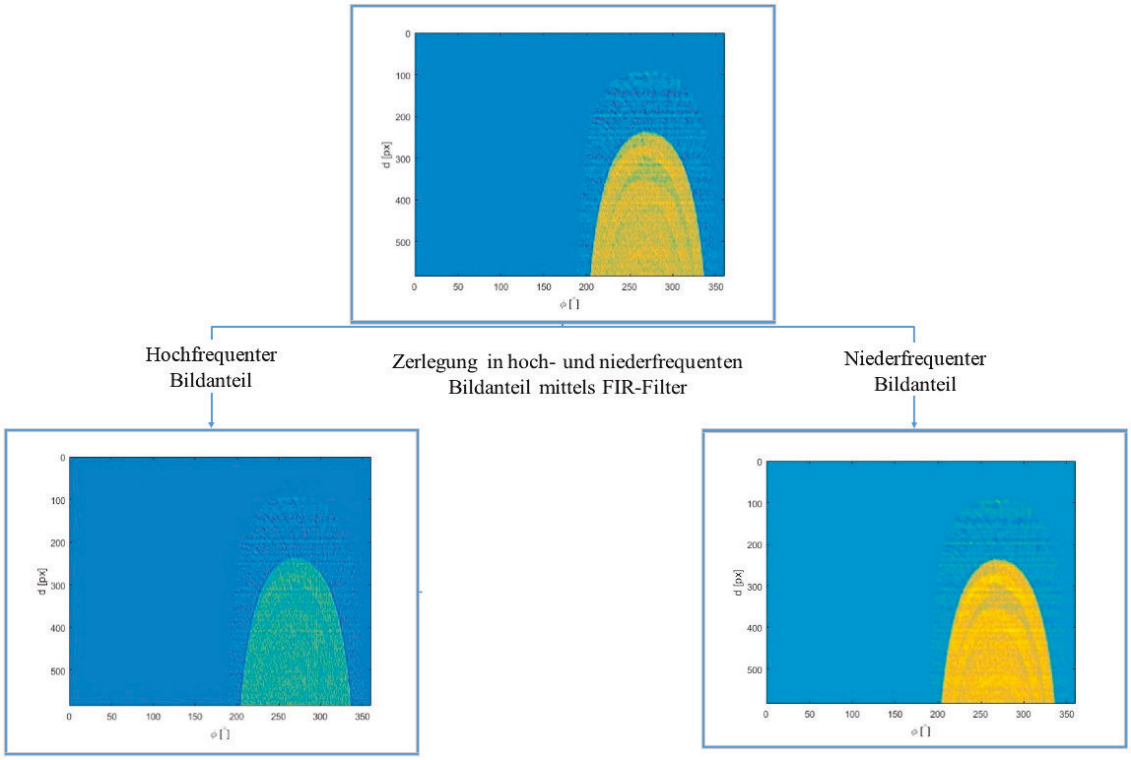


Abbildung 4.9-2 Separierung des verrauschten Originalbildes in einen nieder- und hochfrequenten Anteil

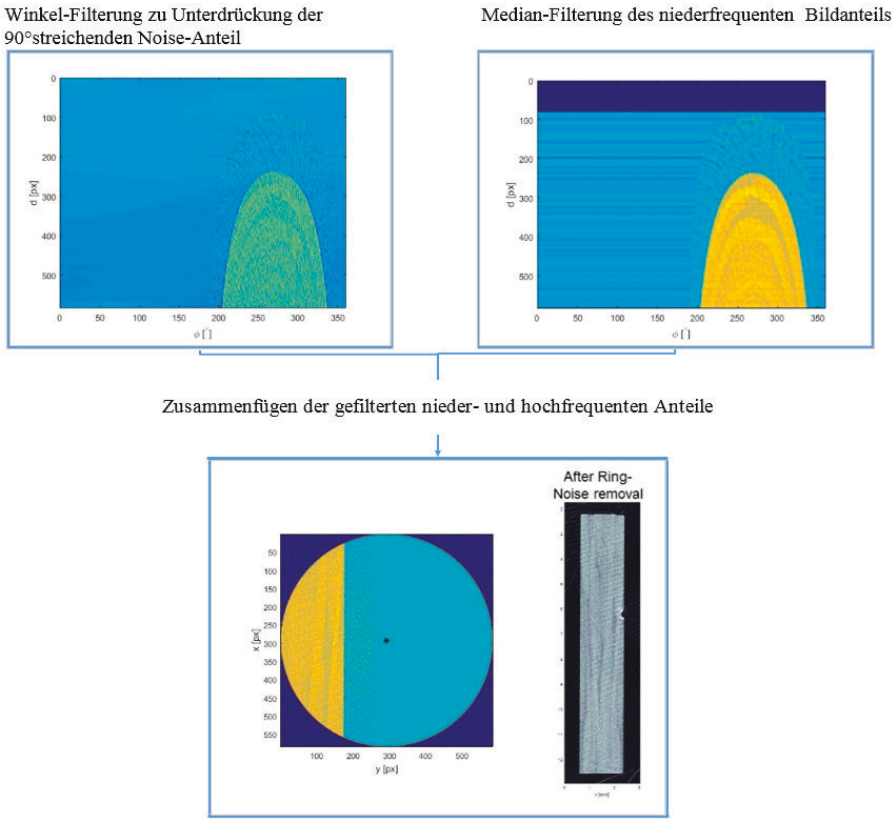


Abbildung 4.9-3 Zusammenführung der gefilterten nieder- und hochfrequenten Bildanteile [45]

In Abbildung 4.9-4 ist vergleichend derselbe Ausschnitt einer tomographierten Probe dargestellt aus der hervorgeht, dass sowohl Matrixfehler (roter Kreis) als auch die Faserverlaufsrichtung (orangenes Rechteck) ohne Filtern nicht erkennbar sind. Folglich ist eine

Filterung für eine bessere Visualisierung der unter Belastung entstandenen Werkstoffschäden unumgänglich.

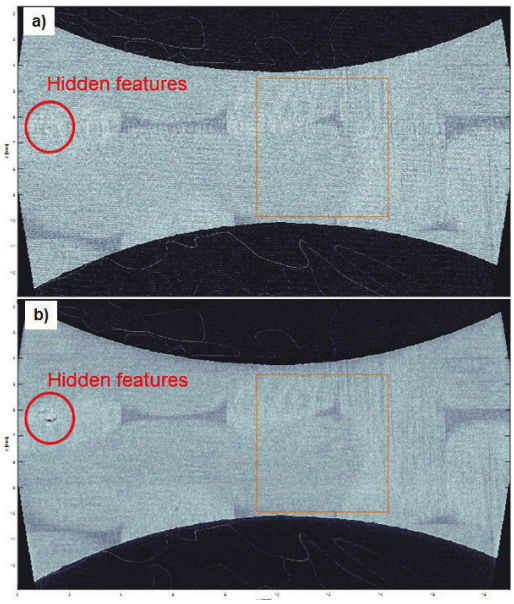


Abbildung 4.9-4 Vergleich einer ungefilterten CT-Aufnahme a) und einer gefilterten CT-Aufnahme b) einer Schnittebene in x-z-Richtung

Zur Schadensdetektion wurden die gefilterten Bilddaten auf Hohlräume und Fehlstellen untersucht, die in der CT-Aufnahme dunkel erscheinen. Zusätzlich wurde eine volumenabhängige Einordnung der einzelnen Voxel durchgeführt, was ein Farbabgleich der einzelnen Voxel in der Nachbarschaft nach sich zog. Somit ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Anzahl an „dunklen“ Voxeln in der Nachbarschaft und der Größe des Schadens im Werkstoff.

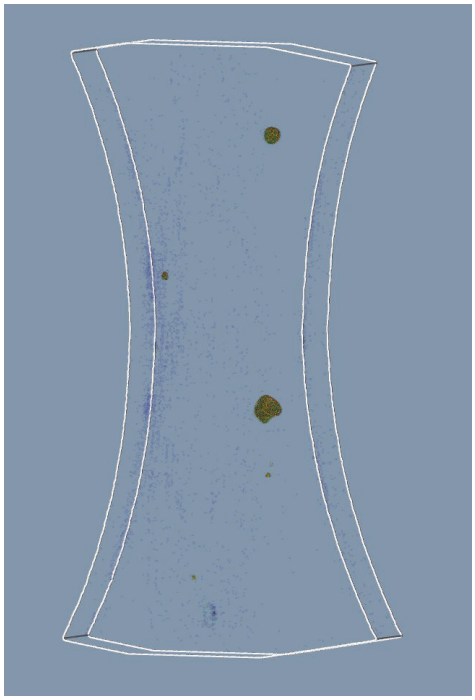
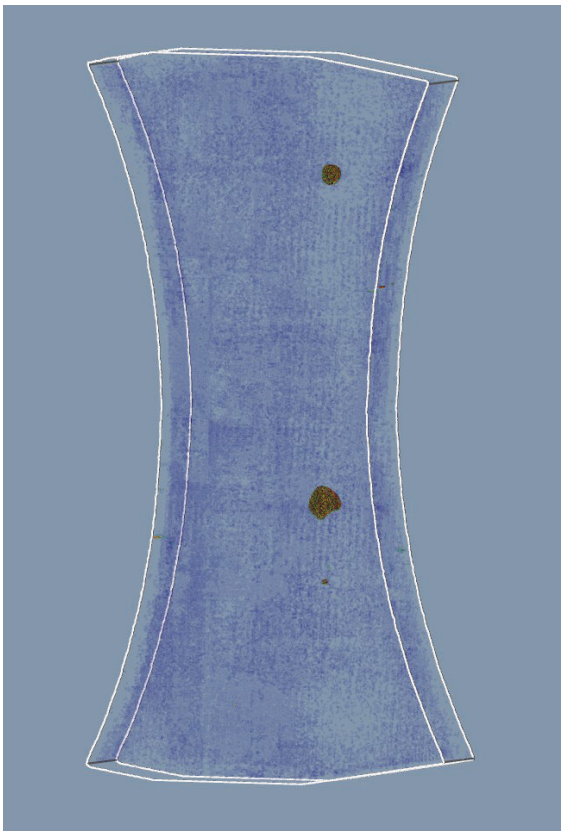
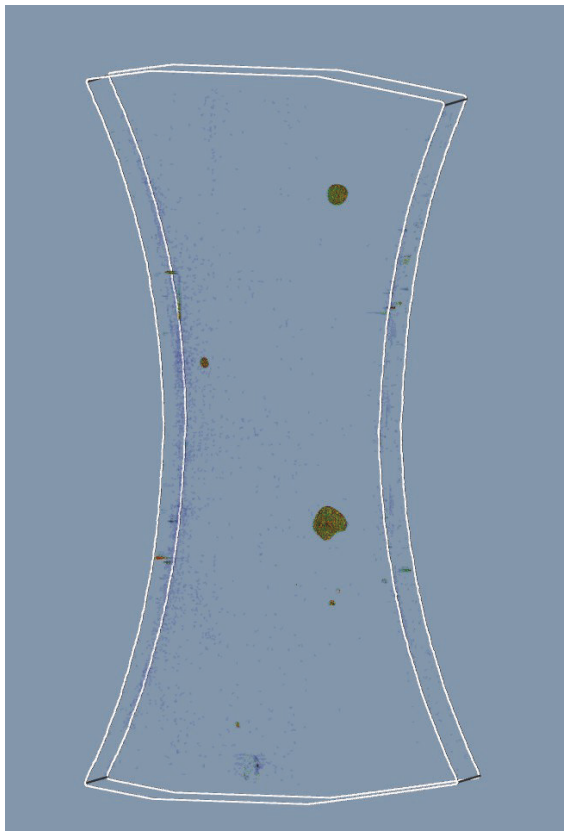


Abbildung 4.9-5 3D-CT-Darstellung der Probe 0/90-15-7 im unbelasteten Zustand

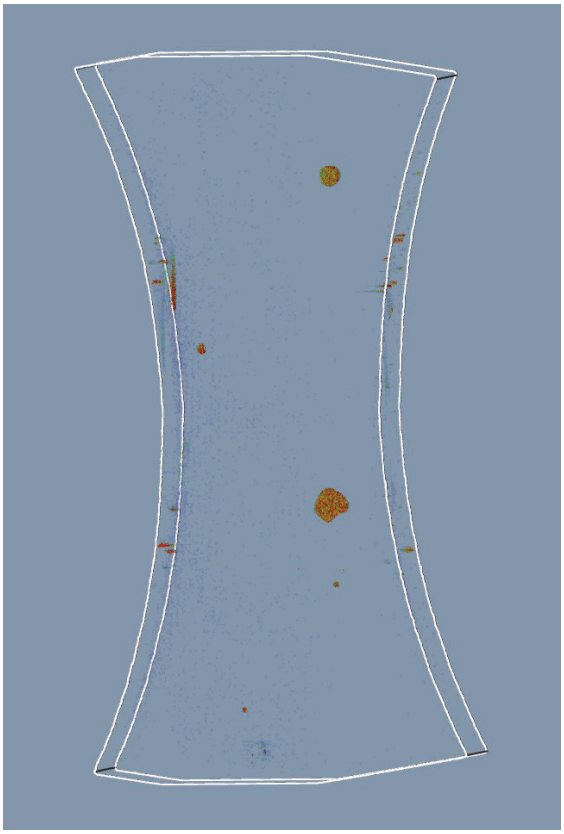
Überführt man die zweidimensionalen Bilddaten in die dritte Dimension ergibt sich für den unbelasteten Zustand einer 0/90° Probe in Abbildung 4.9-5 folgende Darstellung, die die aus Abbildung 4.9-4 bekannten Fehlstellen verdeutlicht. Hier ist die Farbkodierung gemäß der Schadensintensität gewählt, wobei ein geringer Schaden (geringe Anzahl von Nachbarvoxeln mit dunklen Farbwerten) blau dargestellt ist und ein großer Schaden mit rot. Die fertigungsbedingten Fehlstellen treten hier als die größten Fehlstellen hervor und sind mit einer grünen bis roten Farbkodierung versehen. Im Taillenbereich sind vereinzelt geringe Schäden sichtbar, die sehr wahrscheinlich durch die Probenpräparation mittels Wasserstrahlschneiden entstanden sind. Bei den zyklischen Zugversuchen bilden sich weitere Schäden in der gesamten Probe. Die Schadensentwicklung bei unterschiedlich hohen Belastungszuständen ist in Abbildung 4.9-6 für die Probe 0/90-15-7 vergleichend, dreidimensional dargestellt. Bei einer Belastung von 4500 N ist in Abbildung 4.9-6a eine große Anzahl an matrixdominierenden Schädigungen zu erkennen. Es bilden sich Risse, die sich farbkodiert von violett über grün bis rot entwickeln. Ab Abbildung 4.9-6b werden nicht mehr alle farbkodierten Schäden dargestellt, um die Schadensentwicklung in den Hauptschädigungszonen deutlicher darstellen und um deren Entwicklung besser visualisieren zu können. So sind nicht nur die aus Abbildung 4.9-5 bekannten herstellungsinduzierten Fehlstellen zu erkennen, sondern es kommen hauptsächlich horizontal und vertikal verlaufende Risse hinzu, die am Rand der Probe zu finden sind. Die Farbkodierung weist darauf hin, dass es sich um neue, lastbedingte Schäden handelt, die mehrere µm lang sind. Die vergleichende Darstellung über mehrere ansteigende Laststufen zeigt erwartungsgemäß einen Anstieg der Schädigungsintensität. In Abbildung 4.9-6c erkennt man horizontale und vertikale Schädigungsbereiche, die gemäß der Logik hinter der gewählten Farbkodierung auf stärkere Schädigungsereignisse wie die Delaminierung ganzer Faserlagen hinweisen.



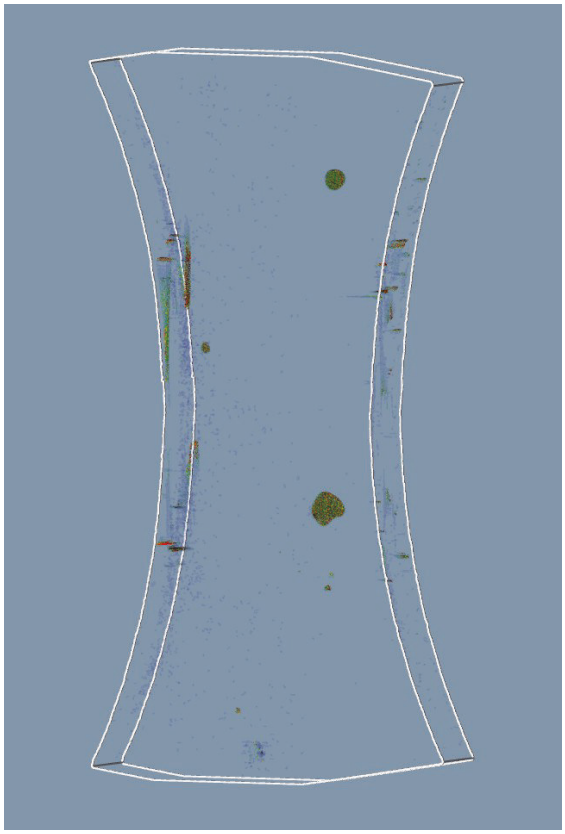
a) Schadensentwicklung nach 4500 N



b) Schadensentwicklung nach 5000 N



c) Schadensentwicklung nach 5500 N



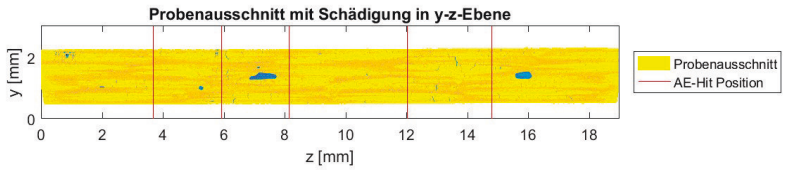
d) Schadensentwicklung nach 6000 N

Abbildung 4.9-6 3D-CT-Darstellung der Schadensentwicklung für die verschiedenen Laststufen bei der Probe 0/90-15-7

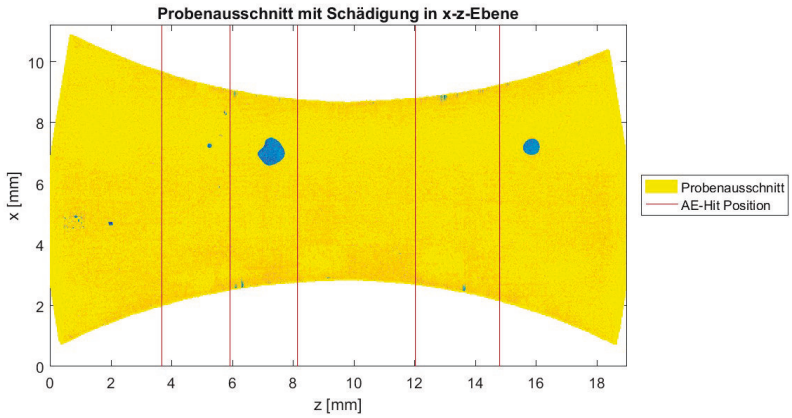
Am stärksten ist dieser Effekt bei der letzten CT-Aufnahme dieser Probe kurz vor Versagen des Prüflings. Abbildung 4.9-6d zeigt eine stark geschädigte Probe in verschiedenen Bereichen, was diese Probe kurze Zeit später kollabieren ließ. Die Auflösung der CT-Anlage konnte bei dieser Versuchskonfiguration keine Einzelfasern und somit keine Faserbrüche darstellen. Folglich sind bei diesen Darstellungen hauptsächlich Schadensentwicklungen der Faserorientierung entlang oder zwischen den jeweiligen Faserlagen auflösbar. Um eine Korrelation der Schallemissionsmessdaten und der CT-Aufnahmen bei dieser Versuchsreihe zu erzeugen, wurden die dreidimensionalen CT-Daten erneut in eine zweidimensionale Darstellungsweise überführt. Es wurde hierfür in jeder Raumrichtung der Minimalvoxelwert identifiziert und in die zweidimensionale Abbildung übertragen. Dazu wurden die gefilterten Bilddaten auf solche Hohlräume, die im CT-Bild schwarz erscheinen, durchsucht (Software „Voxler“) und eine volumenbezogene Klassifikation der einzelnen Voxel durchgeführt. Um den rechnerischen Aufwand so gering wie möglich zu halten, wurden lediglich die Datenpunkte des Probenrandes und die Voxel, welche zu einer Schädigung, also einem mit Luft gefüllten Hohlraum innerhalb der Probe gehören, dargestellt. Das bedeutet, dass jedes Voxel mit seinen Nachbarvoxeln auf ähnliche Farbwerte verglichen wurde. In der x-y-Ebene sind folglich die Minimalvoxelwerte der y-Richtung aufgeführt.

Bei den Probeversuchen mit Schallemissionsanalyse wurden die Schallemissionssignale eindimensional entlang der z-Achse lokalisiert. Es genügt dann die Ergebnisse der Schallemissionsmessung in der y-z-Ebene und der x-z-Ebene als Linien darzustellen, auf der das Schallemissionssignal entstanden war. Die Zusammenführung der Darstellung der

lokalisierten Schallemissionssignale mit den aufsummierten CT-Bildern der Probe 0/90-15-7 je nach unterschiedlicher Laststufe ist in Abbildung 4.9-7 bis Abbildung 4.9-10 dargestellt. Es ist dabei wichtig, die Ergebnisse aus beiden Raumrichtungen zu betrachten, um eine abschließende Interpretation der Messergebnisse vornehmen zu können. In Abbildung 4.9-7a existieren kleine Risse oder Rissansätze, die teilweise gut mit der Position der lokalisierten Schallemissionssignale korrelieren. Bei näherer Betrachtung (Abbildung 4.9-7b) wird deutlich, dass die Risse lediglich in den Randzonen der Probe auftreten und folglich die Schallemissionssignale aus dem Randbereich sein müssen.



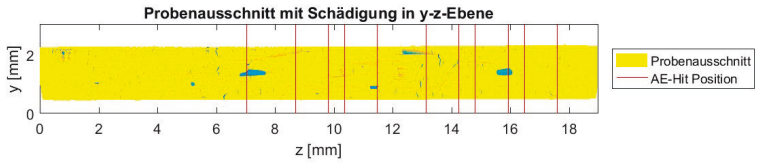
a) Reale Schädigung und AE-Daten in y-z-Ebene



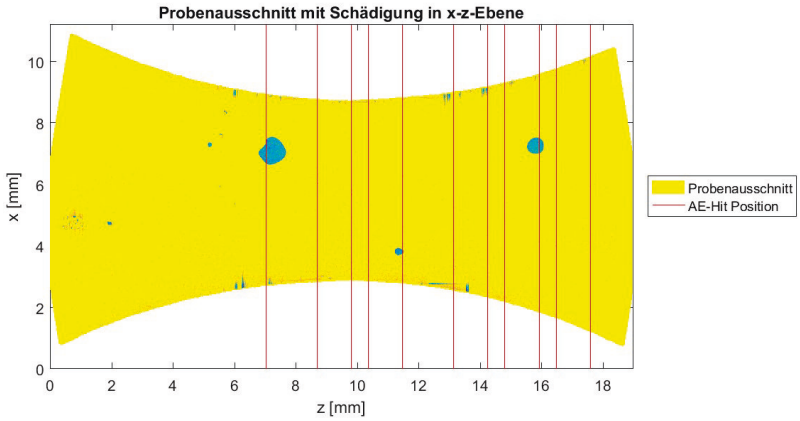
b) Reale Schädigung und AE-Daten in x-z-Ebene

Abbildung 4.9-7 Reale Schädigung und AE-Daten der Probe 0/90-15-7 bei einer Laststufe von 4500 N

In Abbildung 4.9-8 ist ein deutlicher Schädigungsfortschritt zu erkennen. So prägt sich das Risswachstum stärker aus und zusätzlich zu den in Abbildung 4.9-8a erkennbaren Rissen in der y-Richtung ist bei ca. 13mm ein Riss entlang der z-Achse zu erkennen, die mit einer Schallemissionssignalmarkierung (rote Linie) gekennzeichnet ist.



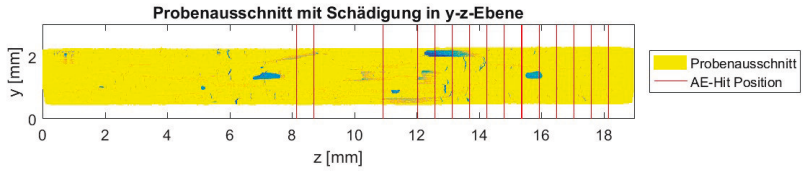
a) Reale Schädigung und AE-Daten in y-z-Ebene



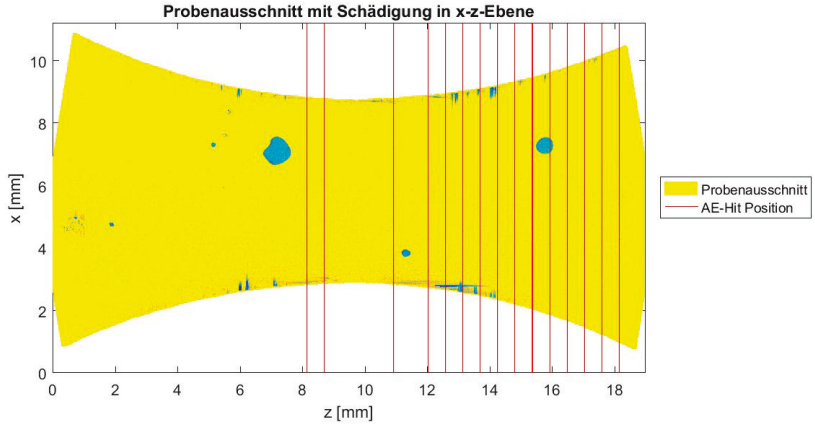
b) Reale Schädigung und AE-Daten in x-z-Ebene

Abbildung 4.9-8 Reale Schädigung und AE-Daten der Probe 0/90-15-7 bei einer Laststufe von 5000 N

Ebenso ist eine Schädigungsentwicklung im Vergleich der Darstellungen in Abbildung 4.9-7b zu Abbildung 4.9-8b zu erkennen. Es sind entlang der z-Achse gegenüber des Risses weitere Schäden in x-Achsenrichtung dargestellt, die bei einer CT-Aufnahme bei einer niedrigeren Lastrampe in Ansätzen schon vorhanden waren. Das dort lokalisierte Schallemissionssignal kann zu einer sehr hohen Wahrscheinlichkeit dem Risswachstum zugeschrieben werden. Zusätzlich können anderen Schallemissionssignalen entweder neue oder sich verstärkende Schäden zugeordnet werden. Exemplarisch steht hier der Schaden bei 9mm auf der x-Achse und 14mm auf der z-Achse, der sich bei der CT-Aufnahme nach der nächsten Laststufe von 5500 N noch deutlicher abzeichnet und eine endgültige Korrelation des Schädigungsfortschrittes zu den Schallemissionssignalen darstellt (Abbildung 4.9-9). Der Riss bei 13mm auf der z-Achse ist mittlerweile auf über 2mm Länge angewachsen und dieses Risswachstum erzeugte in diesem Bereich mehrfach Schallemissionssignale. In Abbildung 4.9-9a ist zusätzlich ein Riss in z-Achse von 11mm bis 12,5mm und 8mm bis 9mm sichtbar, der von querenden Linien der Schallemissionsaktivität flankiert wird. Aus Abbildung 4.9-9b wird deutlich, dass der Ursprung der Schallemissionssignale hauptsächlich in der Mitte der Taillierung (x≈3mm) liegt. Insgesamt stimmen die georteten Schallemissionssignale, die durch die roten Linien dargestellt sind, gut mit den unterschiedlichen Schädigungen im Werkstoff überein.



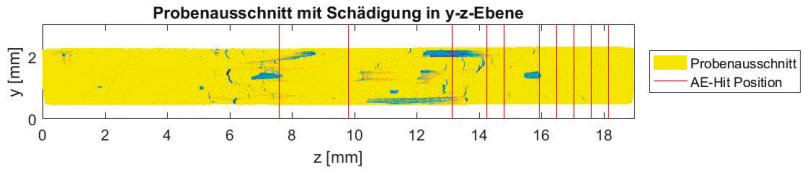
a) Reale Schädigung und AE-Daten in y-z-Ebene



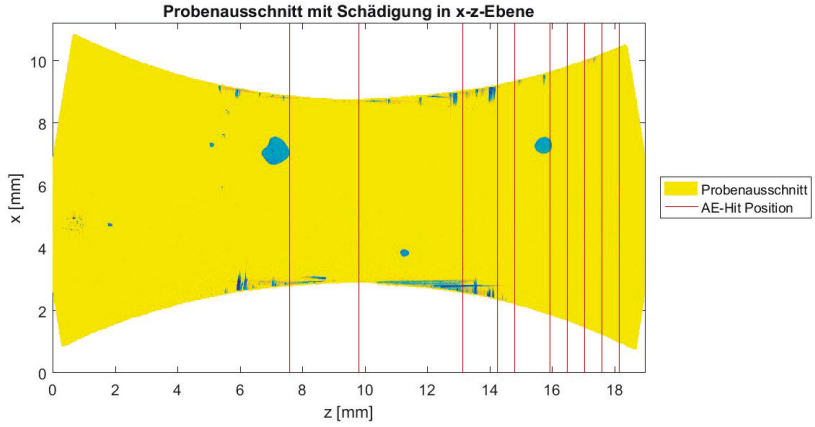
b) Reale Schädigung und AE-Daten in x-z-Ebene

Abbildung 4.9-9 Reale Schädigung und AE-Daten der Probe 0/90-15-7 bei einer Laststufe von 5500 N

Bei den letzten CT-Aufnahmen bei einer Laststufe von 6000 N kurz vor dem Versagen der Probe kann man starke, sichtbare, teilweise mehrere Millimeter lange Beschädigungen in Abbildung 4.9-10 feststellen, die mit gemessenen Schallemissionssignalen in Verbindung gebracht werden können. Beim dargestellten Probenabschnitt sind Schäden bei 7,5mm, 13mm und 14,5mm auf der z-Achse eindeutig dem Risswachstum zuzuweisen. Wohingegen geortete Schallemissionssignale bei 16mm bis 18mm auf der z-Achse bei dieser CT-Aufnahme keine Zuordnung zu spezifischen Schäden erfolgen kann. Es handelt sich sehr wahrscheinlich um eine Schädigung (z.B. Mikrorisse in der Matrix oder Einzelfaserbrüche) die in diesem Bereich erstmals auftritt und dementsprechend klein ist und somit nicht von der CT-Anlage aufgelöst werden kann. Die roten Linien, welche den lokalisierten Ursprung der Schallemissionsquellen kennzeichnen sollen, stimmen nicht immer genau mit der Position des Schadens überein. Es ist eine Tendenz zu erkennen, dass es zu einer leichten Verschiebung in der Darstellung kommt. Wie in Kapitel 4.7.1 In-situ-Messung Schallemission und CT behandelt und von Guz [51] ausgeführt wird, existiert das Phänomen, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen auf belasteten Proben verändern kann, was zu einer ungenauen Ortung führt.



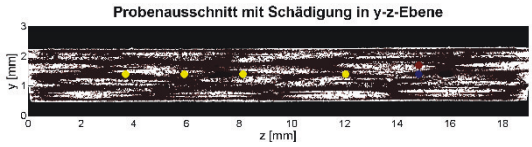
a) Reale Schädigung und AE-Daten in y-z-Ebene



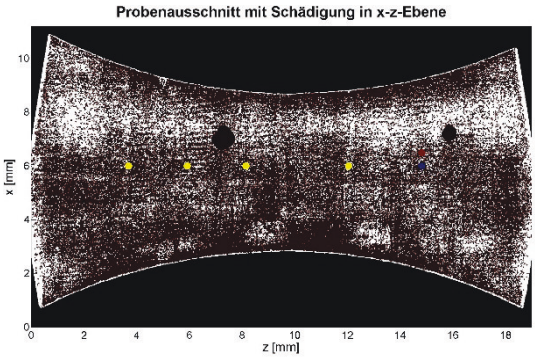
b) Reale Schädigung und AE-Daten in x-z-Ebene

Abbildung 4.9-10 Reale Schädigung und AE-Daten der Probe 0/90-15-7 bei einer Laststufe von 6000

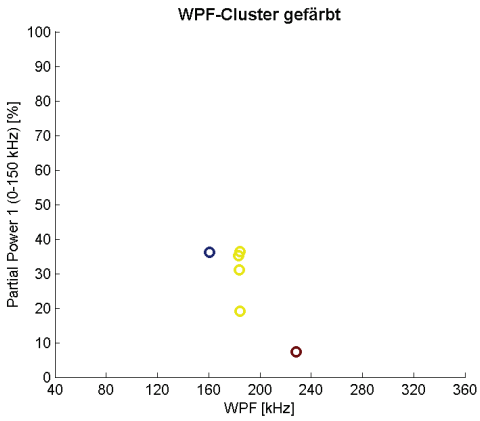
Um einen Zusammenhang zwischen der Schädigungsart und den CT-Aufnahmen herzustellen, werden die Schallemissionsergebnisse gemäß einer Farbkodierung aus der Clusterzugehörigkeit mit den CT-Daten dargestellt. Es geht hierbei um den Nachweis der Clustertheorie in Bezug auf die Zuordnung der Schallemissionssignale zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen in FVKs. Die Schallemissionssignale des ersten Clusters, welchem die matrixdominierenden Schädigungsmechanismen zugeordnet sind, werden mit blauer Farbe dargestellt. Signale, die faserdominierende Schädigungsmechanismen in Cluster drei visualisieren sollen, werden mit roter Farbe dargestellt und die Signale aus dem Interface-Versagens-Cluster sind gelb farbkodiert. Diese einheitliche Farbkodierung wird auf alle folgenden Teilabbildungen angewendet und Signale mit gleicher z-Koordinate werden versetzt dargestellt, um eine Überlagerung der Datenpunkte zu vermeiden. Es wird weiterhin mit einer eindimensionalen Lokalisierung geortet und somit gibt die versetzte Darstellung keinen Hinweis darauf, ob ein Schallemissionsereignis eher am Probenrand oder in der Probenmitte seinen Ursprung hat. Die nachfolgende Abbildung 4.9-11 bis Abbildung 4.9-14 stellen die Ergebnisse dieser Versuchsreihe dar. Dabei zeigt Abbildung 4.9-11 die zweidimensionale Darstellung der CT-Untersuchung bei einer Laststufe von 4500 N in der y-z-Ebene und der x-z-Ebene (Abbildung 4.9-11a und Abbildung 4.9-11b) sowie die zugehörige Clusterdarstellung der verzeichneten Signale (Abbildung 4.9-11c). Die Clustereinteilung wurde wie folgt definiert und farblich kodiert. Das Matrixversagen liegt zwischen. 160 bis 180 kHz und ist blau farbkodiert, das Faser-Matrix-Versagen liegt zwischen 180 und 210 kHz (gelb) und das Faserversagen bei ca. 220 bis 240 kHz (lila) und ist für die gesamte Versuchsreihe identisch.



a) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in y-z-Ebene



b) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in x-z-Ebene



c) Clusterdarstellung der in der nebenstehenden Abbildung lokalisierten Ereignisse

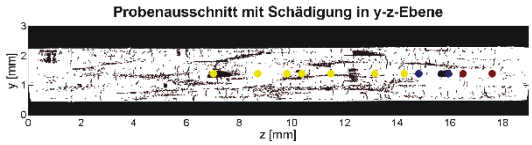
Abbildung 4.9-11 Lokalisierte Schallemissionsquellen auf Probe 0/90-15-7 mit dazugehöriger Clusterdarstellung nach einer Laststufe von 4500 N

Bei einer Laststufe von 4500 N gibt es eine noch relativ geringe Schallemissionsaktivität, jedoch liegen 2/3 der Schallemissionssignale im WPF-PP-Plot im Bereich des Matrix-Interface-Versagens. Dies ist hier bei einem Frequenzbereich von 180 kHz bis 190 kHz. Ein weiteres Signal kann den matrixdominierten Schädigungsmechanismen zugeordnet werden (160 kHz) und eines den faserdominierten Schädigungsmechanismen (230 kHz). Die beiden Signale wurden an derselben Position detektiert. Bei hohen Lasten im Werkstoff könnte das ein Indiz dafür sein, dass ein Faserriss oder Faserbündelriss mit einer großen freiwerdenden Energie ebenfalls die umliegende Matrix schädigt und es so bei zyklischen Versuchen zu diesen zwei grundlegend verschiedenen Schallemissionssignalen führen kann. Allerdings sind die Lasten bei dieser Versuchskonfiguration eher als niedrig einzustufen und es liegt näher, dass vorgeschädigte Einzelfasern im Randbereich der Probe versagten und das niederfrequente Schallemissionssignale gleichermaßen von einem sich vom Probenrand wachsenden Riss herrühren.

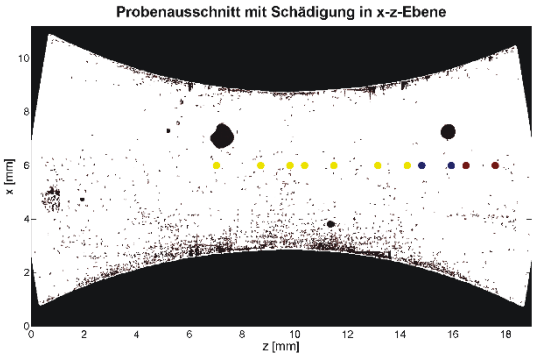
Die Vorschädigungen müssen, wie in vorangegangenen Abbildungen bereits gezeigt wurde, nicht durch die Belastung erfolgt sein, sondern können herstellungsbedingte oder durch die Probenpräparation entstandene Fehlstellen sein. In Abbildung 4.9-7 sind beispielsweise viele Mikroschäden zwischen den Einzellagen zu erkennen, bei denen sich die Matrix zumindest teilweise von der Faser löst, und es somit zu Schallemissionssignalen im Faser-Matrix-Interface-Bereich kommt. Solch geartete Vorschädigungen oder Schäden sind mit CT-Untersuchungen und einer aufwendigen Datennachbearbeitung messbar, werden jedoch mit der hier verwendeten Schallemissionsmesstechnik aufgrund von zu geringen Amplituden und Energien der daraus resultierenden Schallemission vermutlich nicht erfasst. Die CT-Aufnahmen in Abbildung 4.9-7a zeigen Risse in y-Achsenrichtung, die sich entlang und zwischen Faserbündeln ausbreiten. Dies lässt auf einen kombinierten Schädigungsmechanismus schließen, der wiederum mit der Clusterausbildung der dazugehörenden Schallemissionsmessung übereinstimmt. Damit ist man mit den Schallemissionssignalen in der WPF-PP-Darstellung in der Lage, einen Rückschluss auf die

Schädigungsart und den Schädigungsmechanismus im Interface-Versagens-Bereich zu schließen.

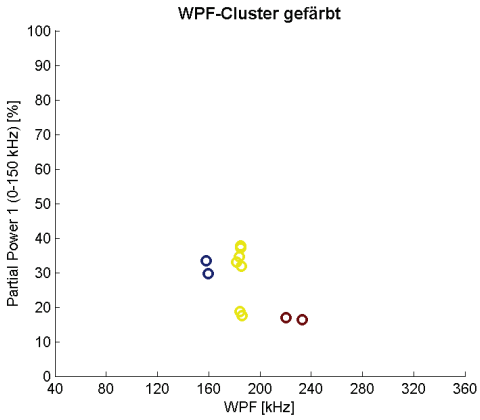
In der nächsten CT-Aufnahme ist ein Schädigungsfortschritt vor allem an den Rändern der Probe aber auch im Probeninnern deutlich sichtbar. Die Farbkodierung im WPF-PP-Plot gibt bei den hochfrequenten Anteilen einen Hinweis auf faserdominierte Schädigungsmechanismen, die bei ungefähr 16,5mm in z-Richtung zu finden sind. Wie bereits erwähnt, kann mittels dieser CT-Anlage keine Aussage zur genauen Schadensposition getroffen werden. Abbildung 4.9-12b zeigt Matrixschäden an der oberen Probenflanke bei ca. 9mm, die bei der CT-Untersuchung des vorangegangenen Lastzyklus ebenfalls schon detektiert wurden. Diesen Schallemissionssignalen können matrixdominierte Schäden zugeordnet werden. Da es sich hierbei um das Weiterwachsen eines Risses in der Matrix handelt, ist es belegt, dass diese Schäden im niedrigen Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz den matrixdominanten Schädigungsmechanismen zuzuordnen sind.



a) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in y-z-Ebene



b) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in x-z-Ebene

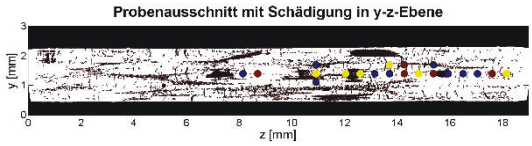


c) Clusterdarstellung der in der nebenstehenden Abbildung lokalisierten Ereignisse

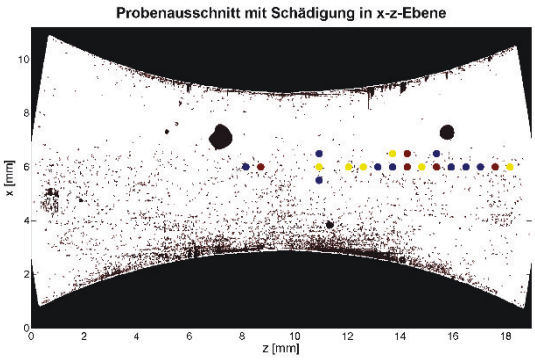
Abbildung 4.9-12 Lokalisierte Schallemissionsquellen auf Probe 0/90-15-7 mit dazugehöriger Clusterdarstellung nach einer Laststufe von 5000 N

Die Signale im mittleren Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz sind auf Schädigungsereignisse oder Schädigungsfortschritte bestehender Schäden zurück zu führen und sind in Abbildung 4.9-12a und Abbildung 4.9-12b dargestellt. Beispielsweise kann eine Zuordnung des Datenpunktes bei 7mm in z-Achsenrichtung und 2mm in x-Achsenrichtung am unteren Probenrand zu einem Schaden erfolgen. Analog verhält es sich bei der Rissbildung bei z≈12,5 mm, x=2 mm und y=2 mm, da das geortete Schallemissionssignal eine gewichtete Vorzugsfrequenz des Faser- Matrix-Interaktionsversagens aufweist. Allerdings ist nicht jedes Schallemissionssignal in diesem Cluster eindeutig zuordenbar. Es entstanden im Randbereich der Probe vertikale und horizontale Risse, die sich entlang der jeweiligen Faserbündel ausbreiteten. Eine noch bessere Abgrenzung der unterschiedlichen Cluster gibt es beim WPF-PP-Plot bei der Messung nach 5500 N. Zum ersten Mal bei dieser Versuchsreihe ist eine starke Häufung der Schallemissionssignale im ersten Cluster zu

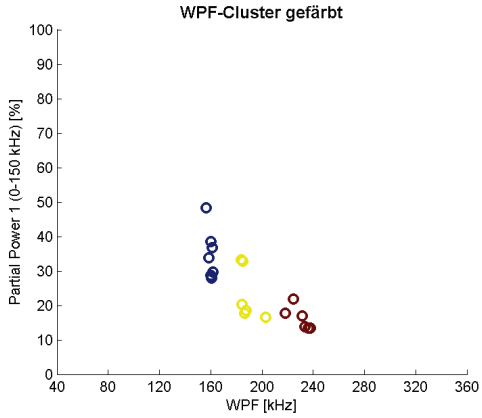
erkennen, was auf ein erhöhtes Versagen im Matrixbereich schließen lässt. Es gibt bei 8mm in z-Achsenrichtung zwei Signale, die sowohl Matrix- als auch Faserversagen aufweisen. Dies lässt die Folgerung zu, dass es sich sehr wahrscheinlich um den Riss bei y=2mm und x=3mm handelt. Aus Abbildung 4.9-13a ist zu entnehmen, dass dieser Riss diagonal über mehrere Faserbündel und somit über mehrere Faserorientierungen hinweg geht. Der Riss stoppt also nicht bei Faserlagen auf die er orthogonal trifft, was die Vermutung nahe legt, dass es sich bei diesem Schallemissionssignal um ein rein faserdominiertes Schädigungsereignis handelt. Dies spiegelt das aufgezeichnete Schallemissionssignal wieder. Durch das zweite Schallemissionssignal im niederen Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz ist es wahrscheinlich, dass sich der Riss an der Rissspitze weiter in die Matrix ausbreitet und ein matrixdominiertes Schallemissionssignal erzeugt. Darüber hinaus sind in z-Achsenrichtung zwischen 10mm und 14mm gehäuft Schallemissionssignale vom ersten und zweiten Cluster gemessen worden. Aus Abbildung 4.9-12a und Abbildung 4.9-12b ist bekannt, dass genau in diesem Bereich ein Riss detektiert wurde. So können die Schallemissionssignale bei einem höheren Lastzyklus in diesen Clustern auf interne Reibvorgänge hinweisen. Genauso verhält es sich mit den Datenpunkten bei z=11mm. Hier wurde ebenfalls das Reiben der Matrix bereits bestehender und wachsender Risse erfasst. Zwei Schallemissionssignale, die auf eine faserdominierende Schädigungsart hinweisen, wurden bei z=14mm geortet. In Abbildung 4.9-13a ist bei y=2mm ein Riss zu sehen, der sich über mehrere Faserbündel zieht und somit sehr wahrscheinlich der Ausgangspunkt der Schallemissionen in diesem Bereich ist.



a) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in y-z-Ebene



b) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in x-z-Ebene

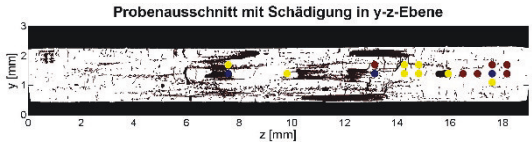


c) Clusterdarstellung der in der nebenstehenden Abbildung lokalisierten Ereignisse

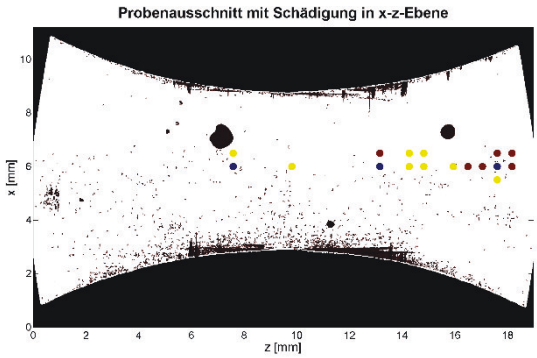
Abbildung 4.9-13 Lokalisierte Schallemissionsquellen auf Probe 0/90-15-7 mit dazugehöriger Clusterdarstellung nach einer Laststufe von 5500 N

In Abbildung 4.9-13b ist diese Beschädigung in x-Achsenrichtung bei 3mm zu sehen. Durch die CT-Bilder lässt sich für die Schallemissionssignale in z-Achsenrichtung ab 16mm keine eindeutige Schädigungsart zuweisen. Die Schallemissionssignale, die auf matrixdominierte Schädigungsmechanismen hinweisen, können dem Risswachstum im Randbereich zugewiesen werden, allerdings ist eine exakte Zuordnung der Schadensereignisse nicht möglich. Analog sind die Schallemissionssignale, die auf faserdominierte Schädigungsmechanismen hinweisen,

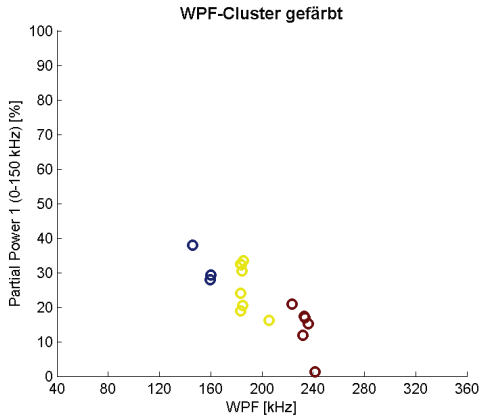
zu interpretieren. Abbildung 4.9-14 zeigt die letzte CT-Aufnahme der Probe 0/90-15-7 kurz vor Versagen bei einer Prüflast von 6000 N. Die aus den CT-Aufnahmen der vorangegangenen Lastzyklen bekannten Schädigungsbereiche sind hier am stärksten ausgeprägt. So ist bei $z \approx$ 8mm Matrix und Interfaceversagen gemessen worden, was auf das Wachsen und Reiben der Rissufer bestehender Schäden zurückzuführen ist. Starke Beschädigungen an der Probenfläche bei z≈ 13mm, x=3mm und x=9mm in Abbildung 4.9-14b sind jeweils Schallemissionssignale zuordenbar. Eine Anhäufung von Schallemissionssignalen des zweiten Clusters bei z=14mm weist genauso auf die starken Beschädigungen am Probenrand hin. Es lösen sich in diesen Bereichen einzelne Faserlagen voneinander ab. Die restlichen Schallemissionssignale in diesem Bereich sind hauptsächlich im dritten Cluster zu finden. Dies deutet auf Faser- und Faserbündelrisse kurz vor Versagen der Probe im Inneren hin.



a) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in y-z-Ebene



b) Reale Schädigung und AE-Daten gefärbt nach der Ortungsposition des jeweiligen Signals in x-z-Ebene



c) Clusterdarstellung der in der nebenstehenden Abbildung lokalisierten Ereignisse

Abbildung 4.9-14 Lokalisierte Schallemissionsquellen auf Probe 0/90-15-7 mit dazugehöriger Clusterdarstellung nach einer Laststufe von 6000 N

4.10 Zusammenfassung in-situ-Versuche

Die Darstellung der CT-Aufnahmen sowie der Ort der Schallemissionssignale im gescannten Probenausschnitt und die Parameterbereiche im WPF-PP-Plot ermöglichen den Übertrag der Schallemissionssignale auf die CT-Aufnahmen. Dadurch ist die Korrelation der Schallemissionssignale und deren Darstellung in den jeweiligen Schadensclustern mit verschiedenen Schädigungsmechanismen durch die CT-Aufnahmen mit live gemessenem Schadensbild und Schadensfortschritt erbracht. Sehr gute Übereinstimmungen sind bei matrixdominierten Schädigungsmechanismen und bei faser-matrixkombinierten Schädigungsmechanismen im Interfacebereich zu finden. Ebenso kann mit der Schallemissionsanalyse und der damit verbundenen Lokalisierung der Schallereignisse bei einer Häufung im immer gleichen Bereich und einer Ausbildung der Schallemissionssignale das Risswachstum in der Matrix und somit der Schädigungsfortschritt aufgezeigt werden. Das Ablösen von kompletten Faserlagen konnte ebenfalls ermittelt werden.

Einzelfaserbrüche sind aufgrund des Auflösungsvermögens der in-situ-CT-Anlage nicht auflösbar gewesen. Jedoch ist bei stark fortgeschrittenem Schädigungszustand der Probe bei Schäden, die über mehrere Faserbündel mit unterschiedlicher Orientierung verlaufen, ein Faserversagen wahrscheinlich. Es wurden in diesen Bereichen der Probe Schallemissionen gemessen, die sich beim WPF-PP-Plot im dritten Cluster befinden. Um Faserbrüche auflösen zu können, müssten Fasern mit einem größeren Durchmesser verwendet und die Geometrie der Probe muss erneut angepasst werden. Sie sollte nochmal schmaler gestaltet werden, sodass die Röntgenröhre näher an den Prüfling herangefahren werden kann. Die Tatsache, dass sich bei den hier dargestellten CT-Aufnahmen unter Last mit eingefügten Schallemissionsdaten eventuell Fehler bei der Lokalisierung der Schallemissionssignale ereignet haben können, da sich die Schallausbreitungsgeschwindigkeit an belasteten Proben ändern kann (Guz, 2002), wird für einen so kleinen Probenausschnitt als unwahrscheinlich angesehen. Die These wird durch eine Vielzahl von georteten Schallemissionsereignissen, denen eindeutig reale Schäden in den erwarteten Schadensclustern zugewiesen werden konnten, gestützt. Die Herleitung zur Korrelation von Schallemissionsparametern in der Clusterdarstellung zu verschiedenen Schädigungsmechanismen wurde exemplarisch mit der Probe 0/90-15-7 durchgeführt. Die Korrelation existiert auch bei allen anderen in-situ-geprüften Proben mit unterschiedlichen Lagenaufbauten. Die Versuchsergebnisse und eine Übersicht der geprüften Proben hierzu sind im Anhang Abbildung 22 bis Anhang Abbildung 55 zu finden (Farbkodierung: blau ca. von 160 bis 180 kHz, grün von ca. 180 bis 210 kHz, gelb von ca. 220 bis 240 kHz). Die Bezeichnung der Proben erfolgt dabei nachstehender Logik: Lagenaufbau-Probenbreite-Probennummer-Nummer des CT Scans.

Im nachfolgenden Kapitel 4.11 wird der Zusammenhang von Schallemissionsparametern und deren Charakteristik in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt des Laminats und unterschiedlichen Festigkeitsklassen der Fasern untersucht. Die Parameterstudie soll als abschließende Versuchsreihe der Couponversuche dieser Arbeit zu einer verbesserten Einstufung und Einordnung der Schallemissionsaktivitäten in FVKs dienen.

4.11 Parameterstudie zum Einfluss auf Schallemissionsparameter

Die Ergebnisse von zuvor durchgeführten Versuchen zur Charakterisierung der Schallemissionsaktivitäten in faserverstärkten Kunststoffproben zeigen hauptsächlich die Ausbildung verschiedener Schadenscluster in Proben mit unterschiedlicher Laminatzusammensetzung sowie den Einfluss verschiedener Harzmaterialien bei gleichbleibenden Kohlenstofffasern. Die für die Parameterstudie untersuchten Proben COTESA-70 bis 77, sowie COTESA-5217 bis 5234 wurden deshalb hinsichtlich der Schallemissionsaktivität in Abhängigkeit von verschiedenen Faservolumengehalten (FVG), sowie Faserfestigkeiten bei weitgehend gleichbleibendem Matrixmaterial während Zugversuchen betrachtet. Die Proben setzten sich dabei aus unidirektionalen (0°) Proben (COTESA-70 bis 77) und Proben in den bisher genutzten Lagenzusammensetzungen 0/90°, ±45° und QI (COTESA-5217 bis 5234) zusammen. Durch die Verwendung verschiedener Fasern im Prepreg wurde die Faserfestigkeit in drei Stufen variiert. Das Prepreg mit der höchsten Faserfestigkeit besaß einen Wert von 5800 MPa. Das nächst festere Prepreg nahm einen Faserfestigkeitswert von 4400 MPa an und das schwächste Prepreg verfügte über eine Faserfestigkeit von 2620 MPa. Je Laminatzusammensetzung wurden dabei drei Probenserien vergleichend betrachtet. Die Variation des Faservolumengehaltes wurde durch eine variierende Anzahl an PeelPly-Lagen im Material bei der Herstellung erreicht. Die PeelPly-Lagen nahmen

das Matrixmaterial auf. Somit ist es möglich den Harzanteil im Laminat zu reduzieren und unterschiedliche Faservolumenanteile darzustellen. Die Laminate wurden ohne PeelPly, mit einer Lage und mit drei Lagen PeelPly jeweils oben und unten hergestellt. Die Tabelle 4.11-1 gibt einen Überblick, welche Probenserien zu den unterschiedlichen Faservolumengehalten und Festigkeiten untersucht und welche Serien vergleichend untereinander betrachtet wurden.

Probenbezeichnung	Faservolumengehalt	Laminataufbau
73	72.30%	uni
75	56.30%	uni
77	66.50%	uni
5226	67.60%	0/90°
5229	70.10%	0/90°
5232	58.70%	0/90°
5227	67.10%	±45°
5230	70.10%	±45°
5233	54%	±45°
5228	66.90%	QI
5231	70.40%	QI
5234	58.20%	QI
Probenbezeichnung	Faserfestigkeit [MPa]	Laminataufbau
70	5800	uni
71	2620	uni
72	4400	uni
5217	2620	0/90°
5218	5800	0/90°
5219	4400	0/90°
5220	2620	±45°
5221	5800	±45°
5222	4400	±45°
5223	2620	QI
5224	5800	QI
5225	4400	QI

Tabelle 4.11-1 Übersicht über Probenserien, die zu Faservolumengehalt und Faserfestigkeit untersucht wurden, farblich markiert sind Serien die vergleichend betrachtet wurden

Im ersten Schritt wurden die Proben hinsichtlich des Faservolumengehaltes untersucht. Wie aus Tabelle 4.11-1 hervorgeht, wurden je drei Probenserien mit demselben Lagenaufbau untersucht. Die Ergebnisse der Proben COTESA-73, 75 und 77 sind in der nachfolgenden Abbildung 4.11-1 dargestellt.

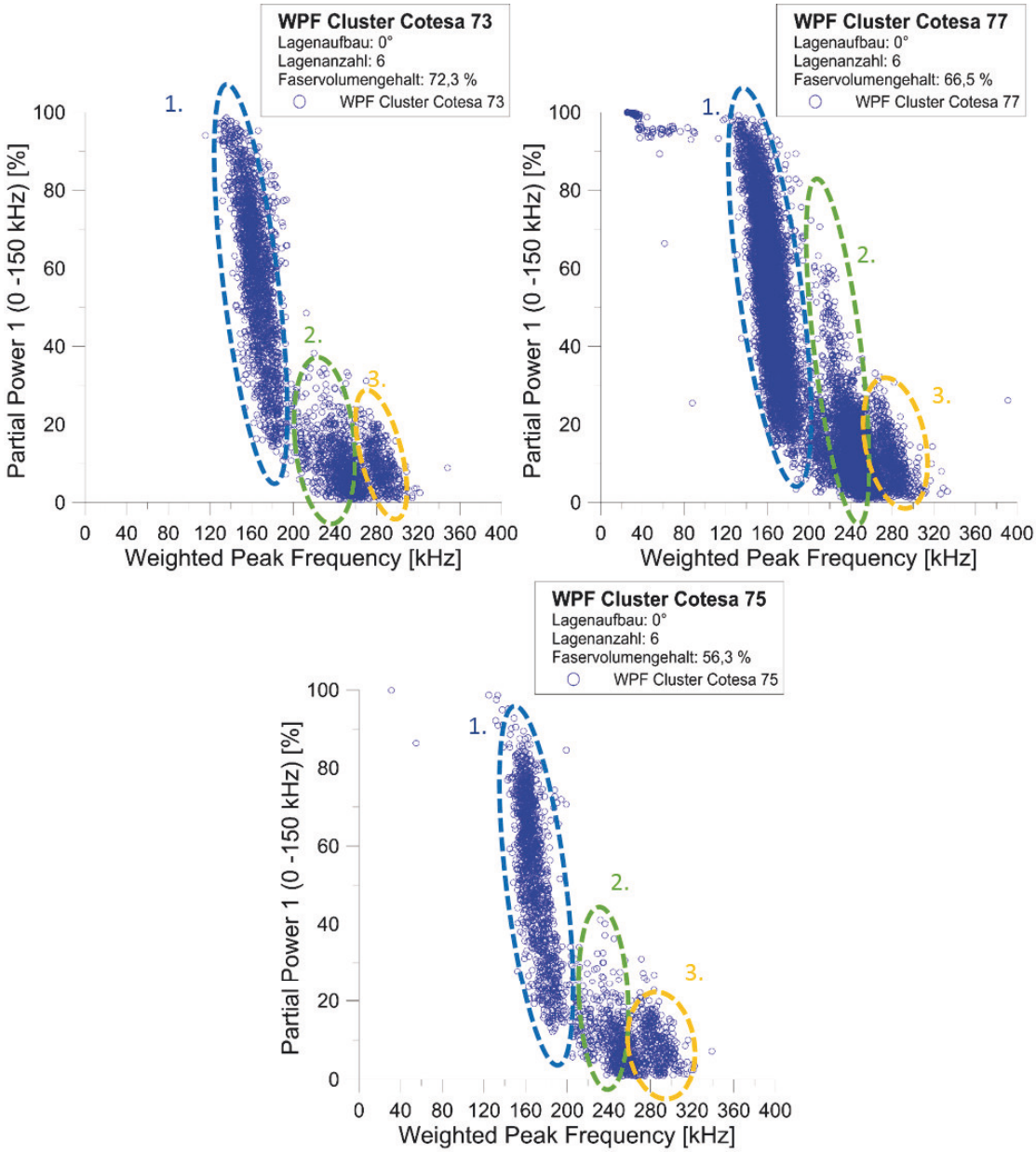


Abbildung 4.11-1 Ergebnisse der Zugproben COTESA 73, 75 und 77; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zum Faservolumengehalt: COTESA-73 72,3%, COTESA-77 66,5%, COTESA-75 56,3%

Die Clusterdarstellungen zeigen die Ausprägung der drei Versagenscluster für Matrixversagen (blau), Interface-Versagen (grün) und Faserversagen (gelb). Die Intensität der Ausprägung der Cluster in der ersten Abbildung weist deutliche Unterschiede auf. Das liegt daran, dass die Proben der Serie 77 mit einer höheren Empfindlichkeit der MAS untersucht wurden, da eine fehlerhaft kalibrierte Setup-Datei verwendet wurde, welche zu einer erhöhten Datenaufnahme geführt hat. Deshalb beinhaltet die Clusterdarstellung der Probe 77 in allen Clustern eine höhere Datendichte als die beiden übrigen Probenserien. Die Darstellungen für die Proben 73 und 75 zeigen eine sehr ähnliche Clusterbildung für das zweite und dritte Cluster sowohl in der

gewichteten Peak Frequenz als auch im Bereich der partiellen Leistung 1. Der größte Unterschied zwischen diesen Probenserien ist im Bereich oberhalb einer partiellen Leistung von 80% ersichtlich. Hier hat die Probenserie 73 deutlich mehr Schallemissionsereignisse, welche auf Delaminationen schließen lassen. Dies ist auf den unterschiedlichen Faservolumengehalt von 16% in den beiden Serien zurück zu führen. Die Wahrscheinlichkeit von gehäuft auftretenden Delaminationen ist in der Probenserie 73 am größten. Durch den höheren Faservolumengehalt ist weniger Matrixmaterial (verringerter Harzanteil) zur Faserstabilisierung enthalten, wodurch sich einzelne Faserlagen eher voneinander ablösen können. Der Vergleich mit der Probenserie 77 liefert deutlichere Änderungen in der Clusterausbildung, insbesondere für das Cluster zwei, welches sich über einen Bereich von 0 bis 80% der partiellen Leistung 1 ausbreitet. Durch die eingestellte erhöhte Empfindlichkeit der MAS sind hier Signale enthalten, die in den übrigen Darstellungen bereits durch die MAS herausgefiltert wurden, da sie eine zu geringe Amplitude besaßen und somit nicht als eigentliches Schallemissionssignal erkannt wurden. Das erste Cluster ist ähnlich deutlich ausgeprägt wie bei der Probenserie 73. Folglich war auch hier der Faservolumenanteil hoch genug, dass sich Delaminationen ereignen konnten. Es fallen jedoch Signale bei sehr geringer gewichteter Vorzugsfrequenz und sehr hohen Leistungsanteilen von nahezu 100% der partiellel Leistung 1 auf. Solche Signale werden überwiegend durch Delaminationen und in der Folge durch Reibvorgänge initiiert.

In der Abbildung 4.11-2 werden die ersten Ergebnisse nichtunidirektionaler Probenserien dargestellt. Im Vergleich zur Abbildung 4.11-1 werden hier Lagen in 0/90° Richtung betrachtet. Auffallend bei der Clusterausbildung ist der Bereich der partiellen Leistung 1, der durch das zweite Cluster umschlossen wird und deutlich höhere Werte annimmt als die der unidirektionalen Proben. Die Varianz des Faservolumengehalts macht sich gleichermaßen am deutlichsten im zweiten Cluster bemerkbar. Während es für die Probenserie 5229, welche den höchsten Faservolumengehalt besitzt, noch sehr deutlich ausgeprägt ist, ist es in der Serie 5232 (geringster Faservolumengehalt) lediglich in Ansätzen erkennbar.

Aus dieser vergleichenden Darstellung der Schallemissionsereignisse an Proben mit unterschiedlichen Faservolumenanteilen ergibt sich eine eindeutige Abhängigkeit der Ausbildung des zweiten Versagensclusters vom Faservolumengehalt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass sich mit abnehmendem Faservolumengehalt das Cluster des Interface-Versagens schlechter ausbildet. Ursächlich für diese charakteristische Clusterausbildung der Schallemissionssignale ist der erhöhte Anteil der Fasern am Gesamtvolumen der Faserverbundes (analog zum Schallemissionsverhalten der Probenserie 73 und 77). Durch den höheren Anteil an Fasern am Gesamtvolumen können sich Delaminationen besser ausbreiten, da die Fasern von einem geringeren Anteil an Matrixmaterial umgeben und stabilisiert sind. Darüber hinaus ist das erste Cluster der Probenserie 5232 im unteren Bereich der partiellen Leistung 1 (bis 40%) durch eine höhere Anzahl an aufgezeichneten Schallemissionssignalen bestimmt als die der beiden übrigen Serien. Durch den höheren Anteil des Matrixmaterials im Verhältnis zum Gesamtvolumen entstand in dieser Probe eine größere Anzahl an Schäden in der Matrix. Das dritte Cluster ist in allen drei Teilabbildungen mit ausreichend Schallemissionssignalen belegt und lässt keinen Rückschluss auf den jeweiligen Faservolumengehalt zu. Es ist lediglich eine höhere Anzahl an Schallemissionsereignissen in diesem Cluster bei der Probenserie 5229 zu erkennen. Dies wirkt sich jedoch nicht auf die Bereichsausbildung des dritten Clusters aus.

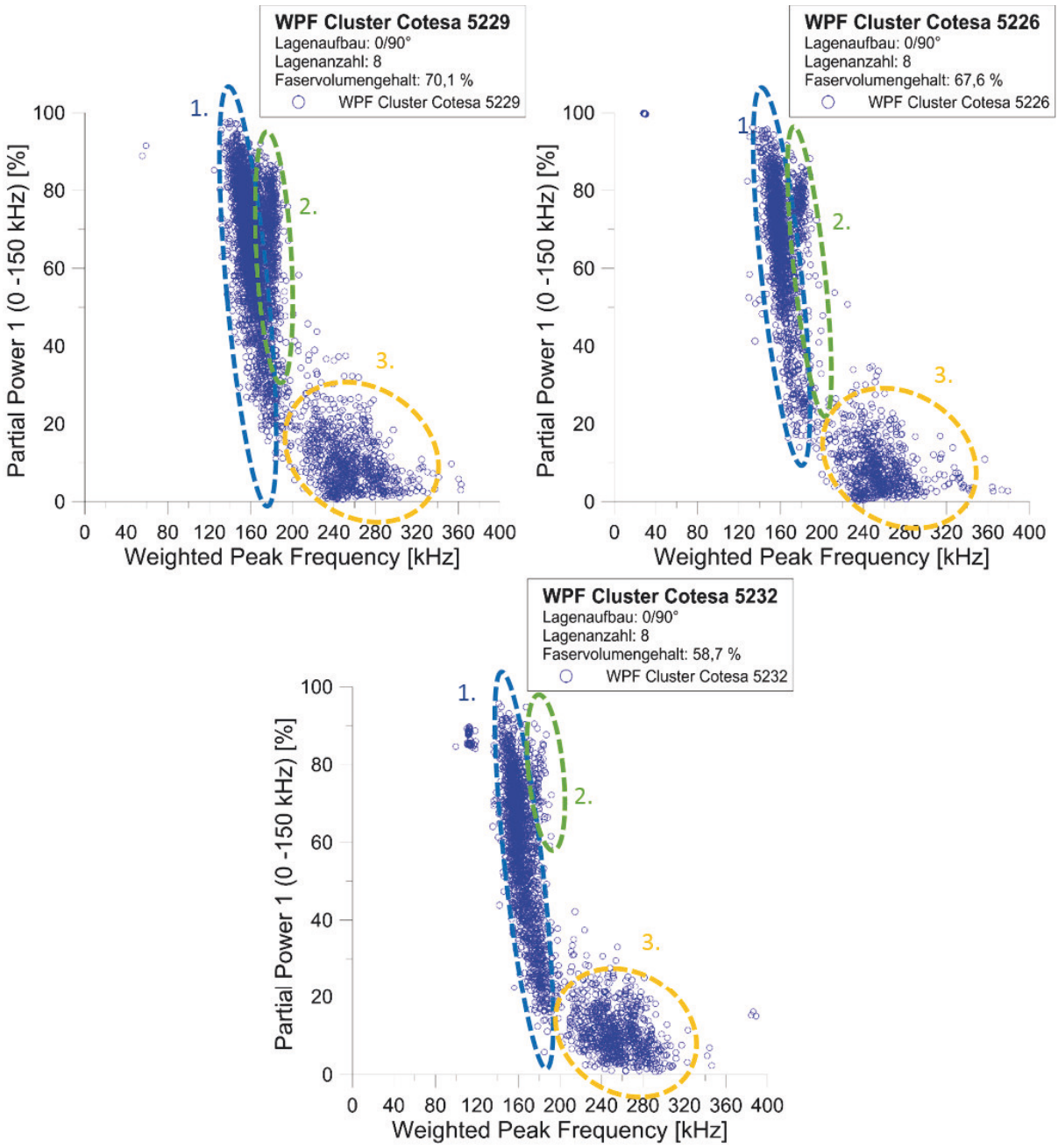


Abbildung 4.11-2 Ergebnisse der Zugproben COTESA 5226, 5229 und 5232; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zum Faservolumengehalt: COTESA-5229 70,1%, COTESA-5226 67,6%, COTESA-5232 58,7%

Die Ergebnisse der Clusterausbildung zur Einstufung der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen hinsichtlich der Ausbildung des dritten Clusters unterscheiden sich bei den Probenserien mit einem ±45° Lagenaufbau deutlicher. Wie in Abbildung 4.11-3 dargestellt, fällt erwartungsgemäß das Cluster, welches für das Faserversagen steht, am geringsten aus. Das erste Cluster (Matrixversagen) ist in allen drei Teilabbildungen das am stärksten ausgebildete Cluster, was sich ebenfalls in der dort vorherrschenden Datendichte niederschlägt. Die Ergebnissdarstellungen lassen Rückschlüsse auf den Einfluss des Faservolumengehaltes zu, da die Ergebnisse der Probenserie 5230 (FVG.: 70,1%) im Bereich des ersten Clusters deutlich weniger Schallemissionssignale zeigen als die Ergebnisse der Serien 5227 mit einem Faservolumengehalt von 67,1%, bzw. der Probenserie 5233 mit einem Faservolumen von 54%.

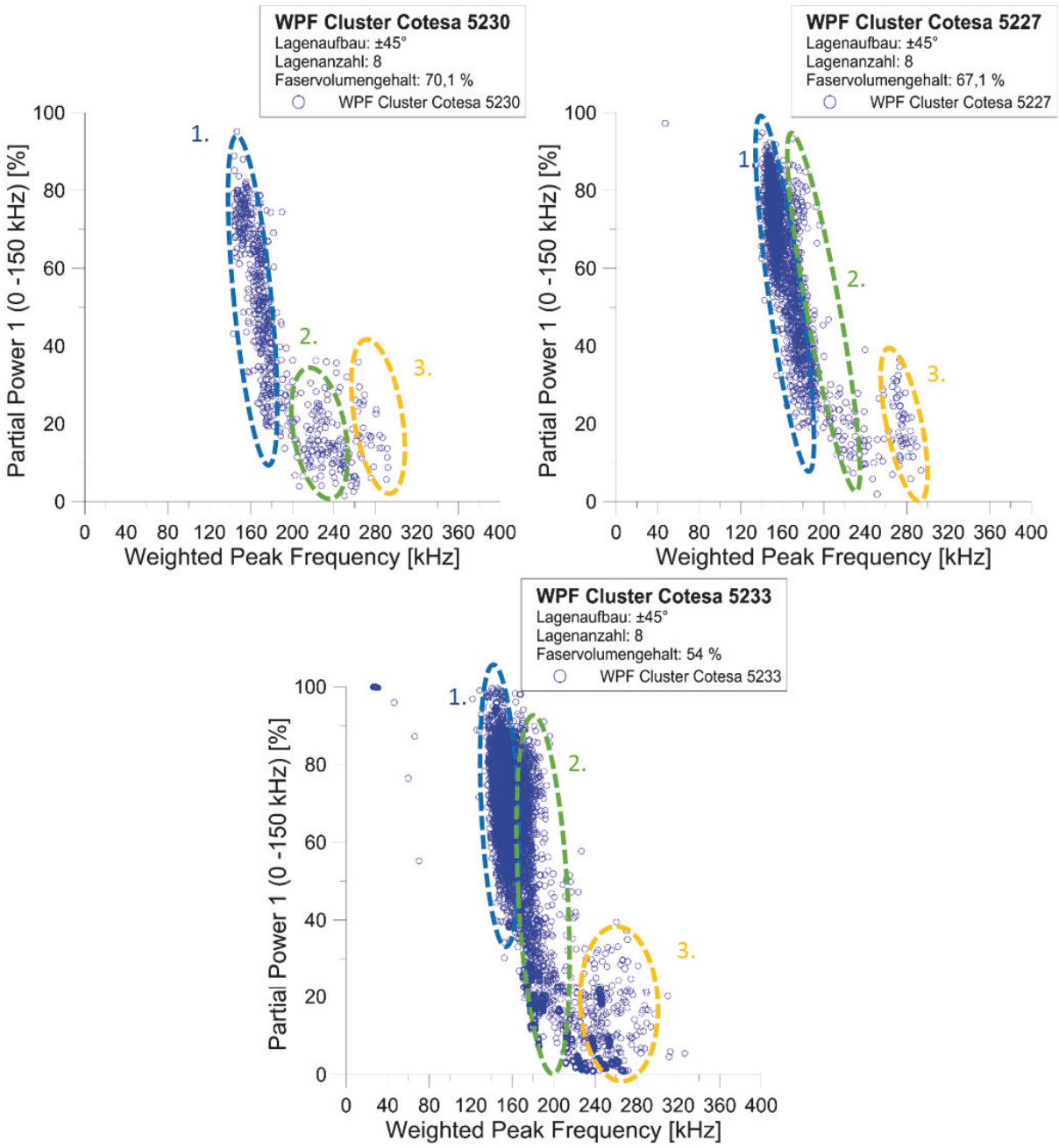


Abbildung 4.11-3: Ergebnisse der Zugproben COTESA 5227, 5230 und 5233; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zum Faservolumengehalt: COTESA-5230 70,1%, COTESA-5227 67,1%, COTESA-5233 54%

Demnach werden bei Proben mit einem ±45° Lagenaufbau mit zunehmendem Faservolumengehalt die Schallemissionssignale, welche Matrixversagen anzeigen, schwächer ausgebildet. Die Schallemissionssignale, die für faserdominierende Schädigungsereignisse stehen, nehmen für diese Laminatzusammensetzung gleichermaßen mit abnehmendem Faservolumengehalt zu. Der höhere Anteil an umgebendem Matrixmaterial stabilisiert zuerst die Fasern und hemmt den Auszug der Faser. Dies kann dann dazu führen, dass dabei vermehrt Faserbrüche angeregt werden, welche durch den Laminataufbau nicht erwartet werden. Die stärkste Änderung in Abhängigkeit der Varianz des Faservolumengehaltes in der Clusterausbildung wird in der Abbildung 4.11-3für die Cluster des Interface-Versagens deutlich. Hier ist eine eindeutige Anhäufung der Schallemissionssignale mit abnehmendem Faservolumengehalt zu erkennen. Des Weiteren ändert sich auch der Bereich der partiellen

Leistung 1, der durch das zweite Cluster umschlossen wird. Die Probenserie 5230, mit dem höchsten Faservolumengehalt, zeigt eine Ausbildung des zweiten Clusters in den unteren 40% der partiellen Leistung 1 und bei etwa 200 bis 250 kHz der gewichteten Vorzugsfrequenz. Einzelne Signale sind sogar oberhalb von 70% erkennbar. Diese sind jedoch aufgrund der zu geringen Anzahl keinem Cluster zuzuordnen. Im selben Bereich der partiellen Leistung 1 zeigt die Probenserie 5227 deutlich mehr Schallemissionsereignisse. Die können dem zweiten Schädigungscluster ebenso zugeordnet werden wie Schallemissionsereignisse die, ähnlich wie in Probe 5230, unterhalb von 40% der partiellen Leistung 1 liegen. Am eindeutigsten bildet sich das zweite Cluster bei der Probenserie 5233 aus. Es befindet sich zwischen 10 bis 90% der partiellen Leistung 1 und über eine Freuquenzbereich von 180 bis 220 kHz. Vor allem im Bereich oberhalb von 50% der partiellen Leistung 1 gibt es dabei eine starke Überschneidung mit Schallemissionsereignissen des ersten Clusters, sodass eine genaue Abgrenzung in diesem Bereich nicht möglich ist. Aus bereits dargestellten Versuchsreihen, die in den Probenserien (Vorbereitungsmessungen für in-situ-Versuche dargestellt in Kapitel 4.6) eine vergleichbare Clusterausbildung erkennen lassen, kann auf die hier eingezeichnete Clusterzugehörigkeit geschlossen werden. Aus den Ergebnissen der Clusterbildung der ±45° Proben kann ebenso geschlossen werden, dass sich für geringere Faservolumengehalte vermehrt Schallemissionsereignisse des Interface-Schädigungsclusters ausbilden. Insbesondere Schallemissionsereignisse mit einem höheren Anteil der partiellen Leistung 1, welche als Delaminationen klassifiziert werden, werden in den Probenserien mit geringem Faservolumen erzielt. Für Proben mit hohem Faservolumenanteil, welche eine vergleichsweise kurze Faser beinhalten, kommt es durch die Geometrie und den Lagenaufbau eher zu Faserauszug als zur Bildung von Delaminationen.

Abbildung 4.11-4 zeigt die Schallemissionsergebnisse der Zugversuche an Proben mit einem quasiisotropen Lagenaufbau in der gewohnten WPF-PP-Darstellung. Aufgrund der Kombination von 0/90° und ±45° Lagen ergibt sich in den Darstellungen eine Kombination aus den zuvor betrachteten Probenserien. Der Effekt auf die Bildung der Schädigungscluster durch die variierenden Faservolumenanteile der Proben ist nicht so deutlich in der Ergebnisdarstellung zu erkennen als bei den zuvor diskutierten Ergebnissen. Im Gegensatz zu den Proben mit einem ±45° Lagenaufbau sind hier alle Cluster mit ausreichend vielen Schallemissionen ausgebildet. Die Probe mit dem höchsten Faservolumengehalt, Probenserie 5231, zeigt eine sehr ähnliche Clusterbildung wie die entsprechende Probenserie mit 0/90° Lagenaufbau. Lediglich die Trennung zwischen den ersten beiden Clustern ist nicht so eindeutig ersichtlich. Dies hängt mit dem Laminataufbau und den daraus folgenden unterschiedlichen Lagenorientierungen zusammen.

Bei den Ergebnissen der 0/90° Proben war die Trennung der Cluster deutlich erkennbar, wohingegen bei den ±45° Proben bei niedrigen Faservolumengehalten ein „Verschwimmen“ der Clusterränder auffällig war. Die Kombination dieser Faserrichtungen führt somit bei der Ergebnisdarstellung der quasiisotropen Proben ebenfalls zu einer Überlagerung der ersten beiden Cluster. Dieser Effekt kann durch interne Reibungen zwischen den unterschiedlich orientierten Laminatlagen erklärt werden (siehe auch Ergebnisdiskussion in Kapitel 4.6). Somit ist der Einfluss des unterschiedlichen Faservolumengehalts bei der Ausbildung der ersten beiden Cluster kaum erkennbar. In den Probenserien 5231 und 5228 mit einem Faservolumen von 70,4 bzw. 66,9% sind nahezu keine Unterschiede für Matrix- oder Interface-Versagen zu erkennen. Das dritte Cluster, welches für faserdominierende Schädigungsmechanismen steht, weist für die Serie 5231 eine leicht höhere Datendichte auf. Dieses ähnliche Verhalten ist auf

den geringen Unterschied von lediglich 3,5% des Faservolumens zurückzuführen. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Serie 5234 (FVG.: 58,2%) zeigt dagegen deutlichere Unterschiede. Während das erste Cluster in ähnlicher Weise ausgebildet ist, finden sich für das zweite Cluster deutlich weniger Schallemissionssignale. Ein identisches Verhalten zeigt sich auch in den Daten des dritten Clusters. Da die Probenserie 5234 den geringsten Faservolumenanteil besitzt, ist dieses Ergebnis in der Form zu erwartungsgemäß.

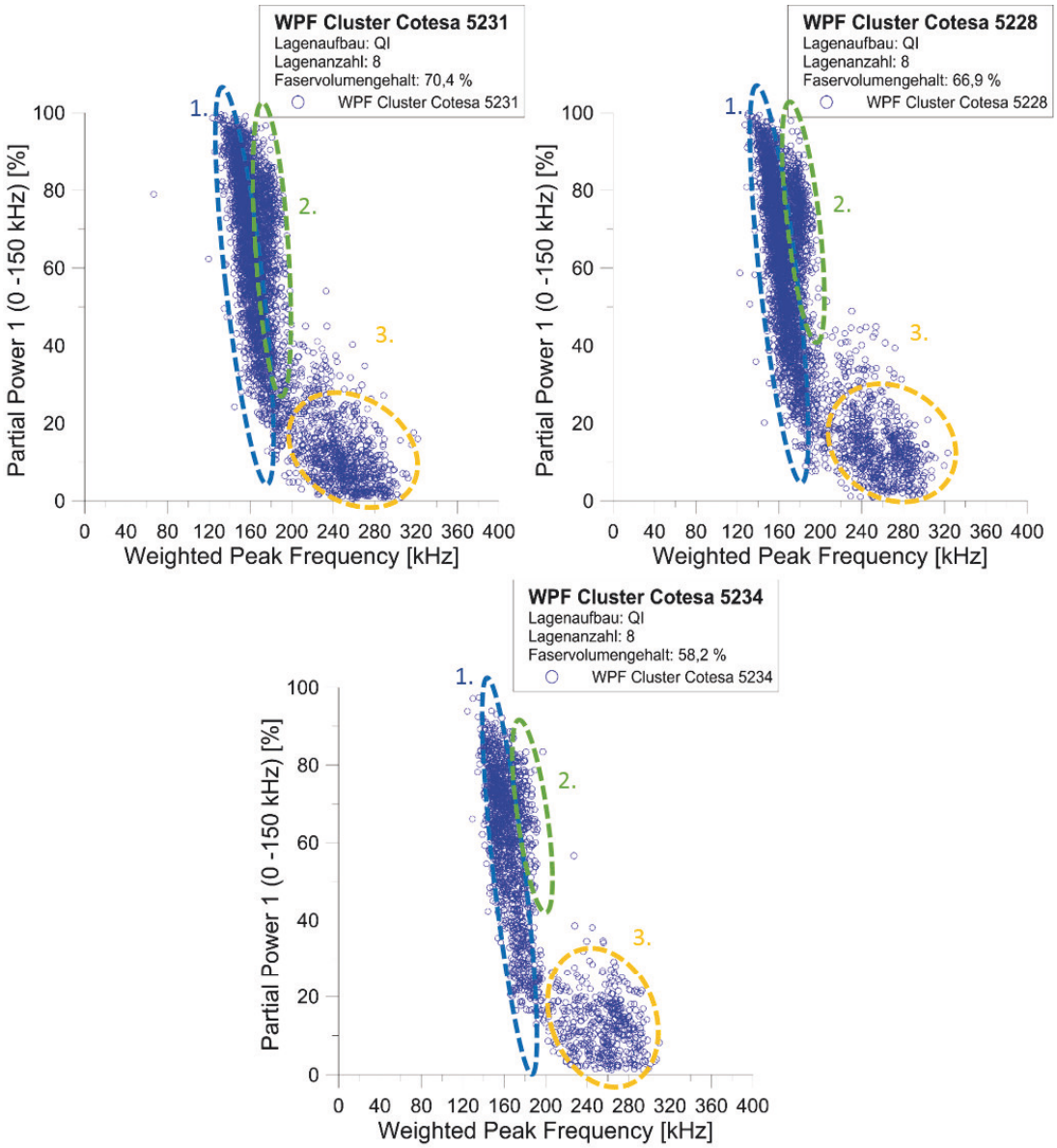


Abbildung 4.11-4: Ergebnisse der Zugproben COTESA 5228, 5231 und 5234; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zur Faservolumengehalt: COTESA-5231 70,4%, COTESA-5228 66,9%, COTESA-5234 58,2%

Abschließend ist festzuhalten, dass die Ausbildung der Schadenscluster nicht allein auf den Faservolumengehalt der einzelnen Probenserien bezogen werden kann. Einen ebenso bedeutenden Anteil besitzt der jeweilige Laminataufbau, sodass es vorkommen kann, dass in Proben mit dem geringsten Faservolumengehalt bei einem Laminataufbau in ±45°-Richtung eine bessere Ausbildung aller drei Schadenscluster erkennbar ist als bei hohem Faservolumengehalt. Proben mit einem 0/90° oder QI Lagenaufbau zeigen dagegen den umgekehrten Fall.

Im Folgenden soll es um den Einfluss verschiedener Faserfestigkeiten auf die Ausbildung der drei Schadenscluster gehen. Dazu wurden im zweiten Teil der Parameterstudie je drei Laminatserien mit gleichem Aufbau und verschiedenen Faserfestigkeiten untersucht. Die Festigkeitswerte wurden vom Hersteller übermittelt und die verwendeten Materialien besaßen folgende Faserfestigkeiten: 5800 MPa, 4400 MPa und 2620 MPa. Ausgehend von den Werten der Faserfestigkeit, sollten bei abnehmender Festigkeit die Schallemissionen im Bereich des Faserversagens zunehmen. Gleichermaßen sollten sich bei hohen Festigkeitswerten der Faser vermehrt Matrixschäden einstellen. Die Abbildung 4.11-5 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche an unidirektionalen Faserverbunden. In den Teilabbildungen ist das erste Schädigungscluster am stärksten ausgebildet. Erwartungsgemäß ist es am deutlichsten bei der Probenserie 70 mit der höchsten Faserfestigkeit ausgebildet.

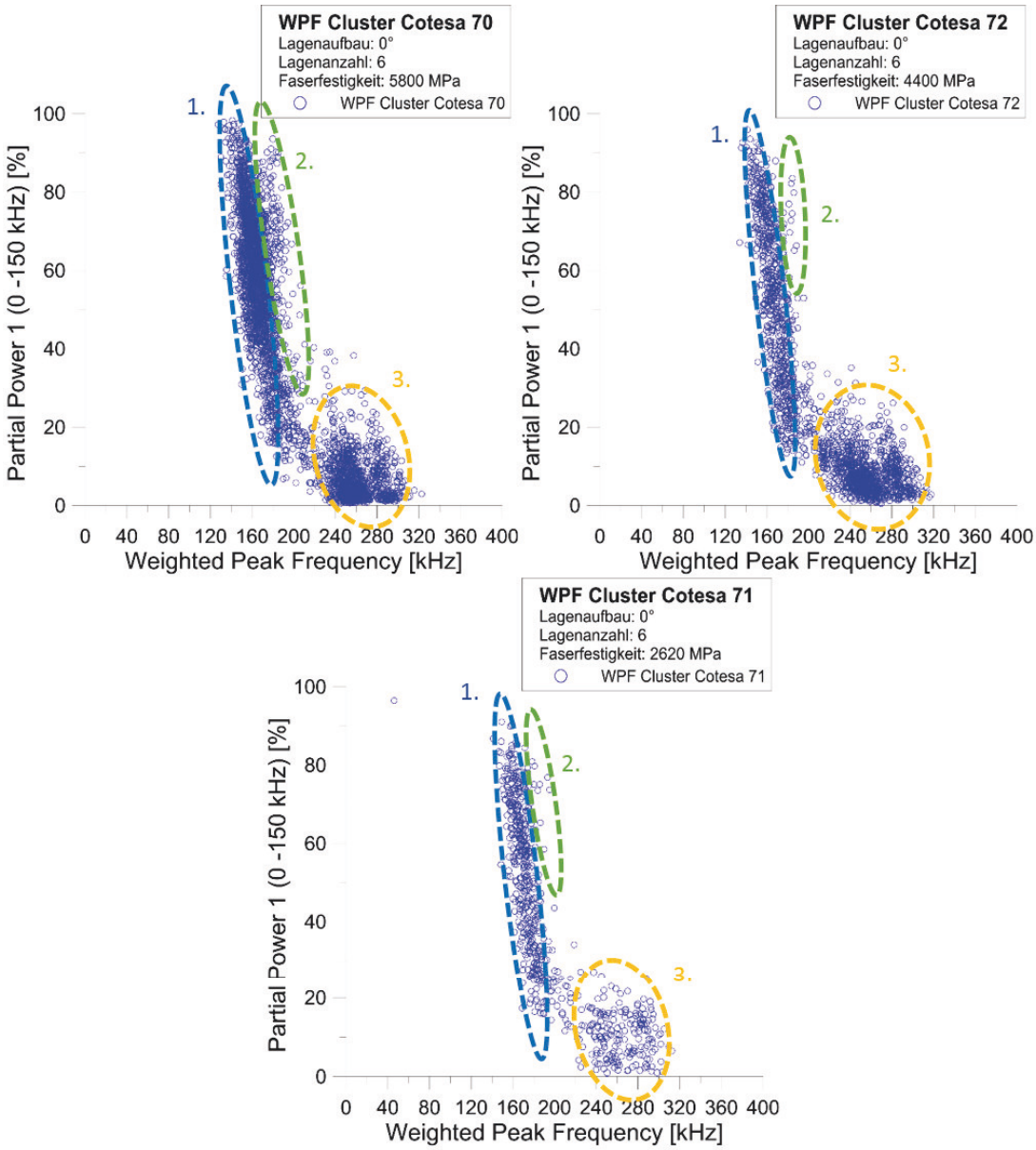


Abbildung 4.11-5: Ergebnisse der Zugproben COTESA 70, 71 und 72; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zur Faserfestigkeit: COTESA-70 5800MPa, COTESA-72 4400 MPa, COTESA-71 2620 MPa

Das bedeutet, dass es in der Probenserie 70 aufgrund der höheren Festigkeit der Fasern vermehrt zu Matrixbrüchen kommt, da die Fasern beim Prüflastregime noch nicht kollabieren. In Untersuchungen die zur Vorbereitung der in-situ-Versuche durchgeführt wurden (Kapitel 4.6), wobei die Faserfestigkeit bei 5490 MPa lag, ist das erste Cluster ebenfalls am deutlichsten ausgebildet. Vergleichend stark ausgeprägt ist das dritte Cluster, welches für faserdominierende Schädigungsmechanismen steht. Dabei zeigen vor allem die Serien 70 und 72 eine hohe Ähnlichkeit was auf die ähnliche Faserfestigkeit zurückzuführen sein kann. Der Unterschied zwischen diesen beiden Serien und der Serie 71 ist indes weitaus größer, da dieses Material mit einer erheblich schwächeren Faser ausgestattet war. Das zweite Cluster der Serie 71 ist kaum mit Schallemissionsdatenpunkten belegt. Vor allem in der Darstellung der Serie 70 hebt es sich deutlich vom ersten Cluster ab. Die beiden anderen Ergebnisdarstellungen zeigen lediglich einzelne Datenpunkte im Bereich des Interface-Versagens. Der Vergleich der unidirektionalen Proben lässt eine erste Abschätzung auf die Abhängigkeit der Clusterausbildung von der Faserfestigkeit zu (zunehmende Schallemissionsaktivität bei zunehmender Faserfestigkeit).

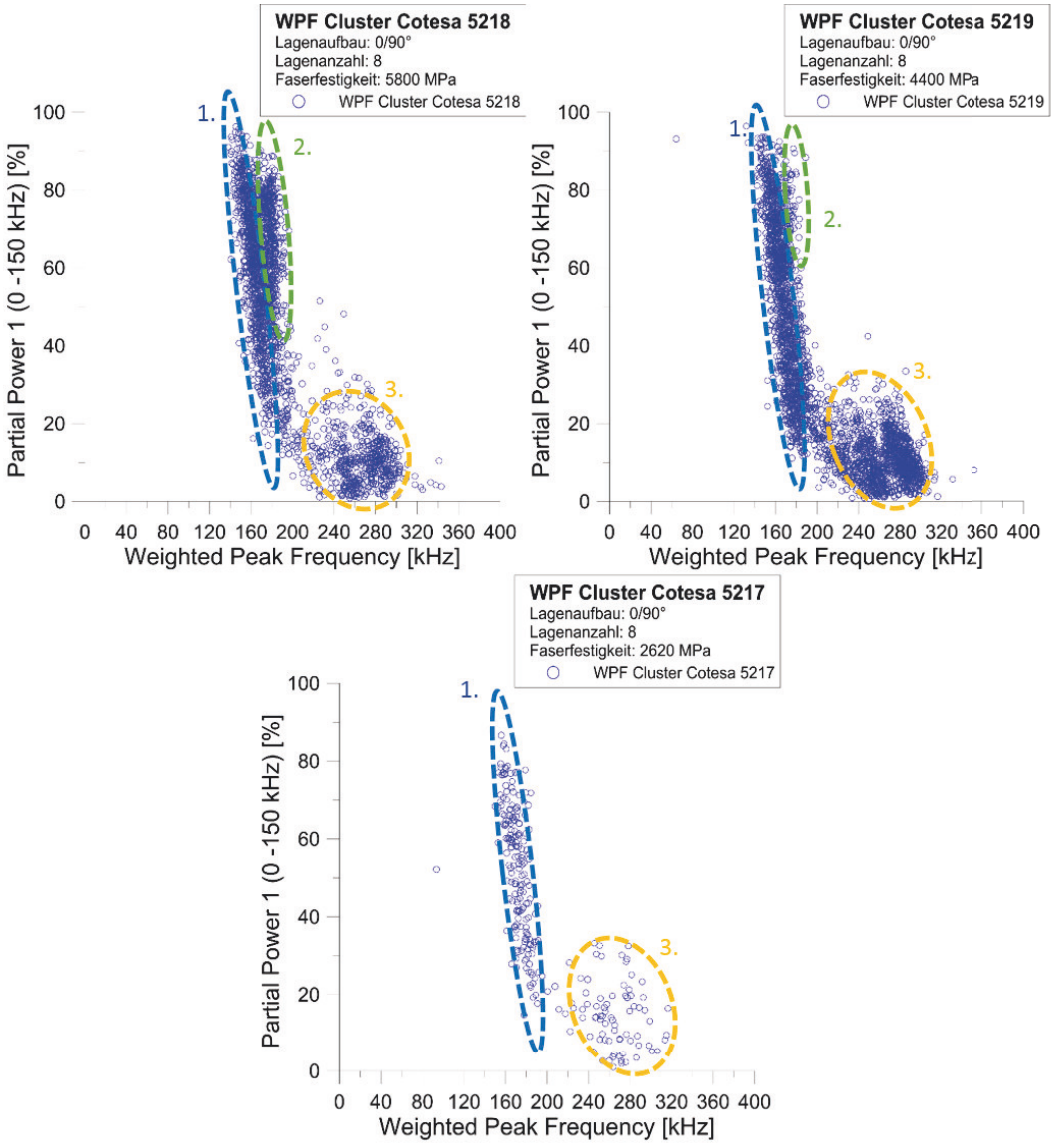


Abbildung 4.11-6: Ergebnisse der Zugproben COTESA 5217, 5218 und 5219; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zur Faserfestigkeit: COTESA-5218 5800 MPa, COTESA-5219 4400 MPa, COTESA-5217 2620 MPa

Abbildung 4.11-6 zeigt die Schallemissionsergebnisse in der WPF-PP-Darstellung für Proben mit einem 0/90° Lagenaufbau. Es sind dabei alle drei Schadenscluster mit einer ausreichenden Schallemissionsdatendichte belegt. Bei den beiden anderen Probenserien erkennt man eine Reduzierung der Datendichte mit abnehmender Faserfestigkeit. Die Ergebnisdarstellung der Serie 5217 ist ereignisärmer, sodass lediglich das erste und das dritte Cluster durch die Daten belegt sind. Die Probenserie 5219 mit einer Faserfestigkeit von 4400 MPa zeigt zwar alle drei Cluster, allerdings ist die Anzahl an Schallemissionssignalen im Bereich des zweiten Versagensclusters deutlich geringer als in der Serie 5218. Analog zu den unidirektionalen Proben ist das erste Cluster in den ersten beiden Probenserien annähernd gleich stark ausgeprägt. Des Weiteren fällt in den Daten auf, dass die Anzahl an Ereignissen im dritten Schadenscluster für das Laminat mit der mittleren Faserfestigkeit (Serie 5219) weitaus höher ausfällt als für die Laminate mit hoher und niedriger Faserfestigkeit. Dieses Verhalten deckt sich nicht mit der Theorie, dass mit abnehmender Faserfestigkeit die Anzahl an Faserschäden zunimmt. Vielmehr scheint es, als ob die höhere Energie, welche beim Versagen festerer Fasern frei wird, zusätzliche Schäden im Material erzeugt und zu einer höheren Faserversagensquote in diesen Materialien führt. Weiterhin muss bei der Betrachtung der Faserfestigkeit die maximal erreichte Zugkraft beachtet werden. Diese lag für die Materialien der Serie 5219 um 10 kN niedriger als bei Proben der Serie 5218. Während F_{max} für die Einzelprobe dieser beiden Serien relativ konstant blieb (±1,5 kN), weist die Serie 5217 bereits in sich erhebliche Schwankungen von ±5 kN auf und erreicht dabei das Kraftniveau der Probenserie 5219. Die Faserfestigkeit hat nach Betrachten der ersten Ergebnisse daher weniger Einfluss auf die Ausbildung der Schadenscluster als vielmehr auf die maximale einleitbare Zugkraft bis die Probe versagt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an Proben mit einem ±45° Lagenaufbau sind in Abbildung 4.11-7 dargestellt. Im Gegensatz zur Probenserie 5217 aus Abbildung 4.11-6 sind in der Serie 5220 alle Cluster enthalten. Jedoch besitzt das erste Cluster bei etwa 75% der partiellen Leistung 1 eine Einschnürung, was den Anschein einer Zweiteilung erweckt. Erwartungsgemäß für ±45° Proben schließt sich das zweite Cluster im oberen Bereich der Partiellen Leistung 1 direkt an das erste an. Das dritte Cluster besitzt, wie zu erwarten bei diesem Aufbau, nur eine geringe Anzahl an Schallemissionsereignissen und die Ergebnisse der Probenserie 5221 und 5222 besitzen eine sehr ähnliche Clustergestalt. In beiden Darstellungen ist das erste Cluster am deutlichsten ausgeprägt und besitzt eine nahezu identische Ausdehnung. Auch das zweite Cluster ist in beiden Probeserien nahezu identisch. Im dritten Cluster, das für faserdominierende Schädigungsmechanismen steht, sind größere Unterschiede erkennbar. Die Ergebnisse der Probenserie 5220 mit einer schwächeren Faserfestigkeit zeigen mehr Faserbrüche als in der Serie 5222 und diese wiederum mehr als die Serie 5221. Hier stimmt die Theorie der Zunahme der Faserbrüche mit abnehmender Zugfestigkeit der Fasern überein. Aufgrund der Faserorientierung in ±45°-Laminaten ist die Faserfestigkeit für die Ausbildung der Cluster allerdings nicht so entscheidend, da in solchen Proben weniger Faserbrüche erwartet werden. Dementsprechend unterscheidet sich die maximale Zugkraft F_{max} der Proben nicht so deutlich wie in den 0/90° Proben. Die Abweichung liegt für alle Proben bei etwa ±200 N, wobei auch hier die Proben mit der schwächsten und die Proben mit der mittelfesten Faser im gleichen Kraftniveau versagen (≈2900 N). Auffallend in der Abbildung 4.11-7 ist die unterschiedliche Gestalt der Versagenscluster der Serien 5221 und 5222 im Vergleich zur Serie 5220. Hier macht sich das unterschiedlich genutzte Harzmaterial bemerkbar. In den Abbildungen der anderen Laminatzusammensetzungen ist dessen Einfluss allerdings vernachlässigbar.

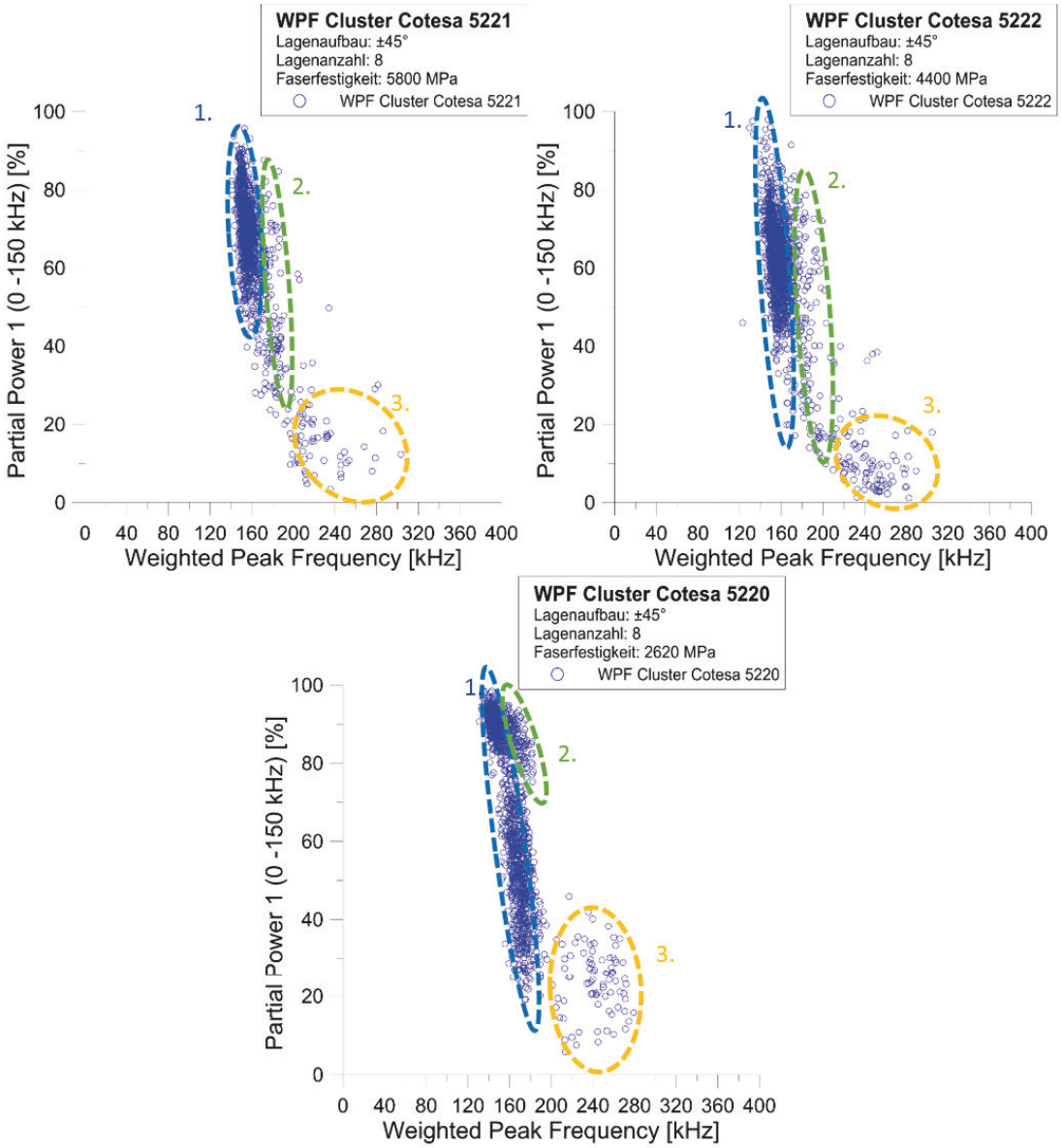


Abbildung 4.11-7: Ergebnisse der Zugproben COTESA 5220, 5221 und 5222; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zur Faserfestigkeit: COTESA-5221 5800 MPa, COTESA-5222 4400 MPa, COTESA-522 2620 MPa

Zuletzt sind abschließend für die Parameterstudie in Abbildung 4.11-8 die Schallemissionsergebnisse in der WPF-PP-Darstellung der Proben mit einem quasiisotropen Lagenaufbau dargestellt. Die Darstellung der Probenserie 5223 zeigt in allen Clustern weniger Schallemissionsereignisse als die beiden anderen Darstellungen. Dies ist auf die geringe Zugfestigkeit der Fasern zurückzuführen. Das zweite Versagenscluster wird am deutlichsten in der Teilabbildung der Probe 5224 ersichtlich und ist in den beiden übrigen Probeserien nur kaum ausgebildet. Bei Betrachtung der 0/90° Ergebnisse in Abbildung 4.11-6 fällt eine ähnliche Clusterausbildung auf. Auch hier ist das zweite Cluster am deutlichsten in der Probenserie mit den höchsten Faserfestigkeiten abgebildet. Dies kann durch die höhere Bruchdehnung der festeren Fasern erklärt werden, die bei Fasern mit einer Festigkeit von 5800 MPa bei etwa 2% liegt. Die schwächsten Fasern besitzen dagegen lediglich eine Bruchdehnung von 0,4%. Es kommt demnach in den Materialien mit festen Fasern eher zu Reibeffekten, welche durch die

Faserdehnung erzeugt werden und somit Schallemissionen generieren, die dem Interface-Versagenscluster zugeordnet werden können.

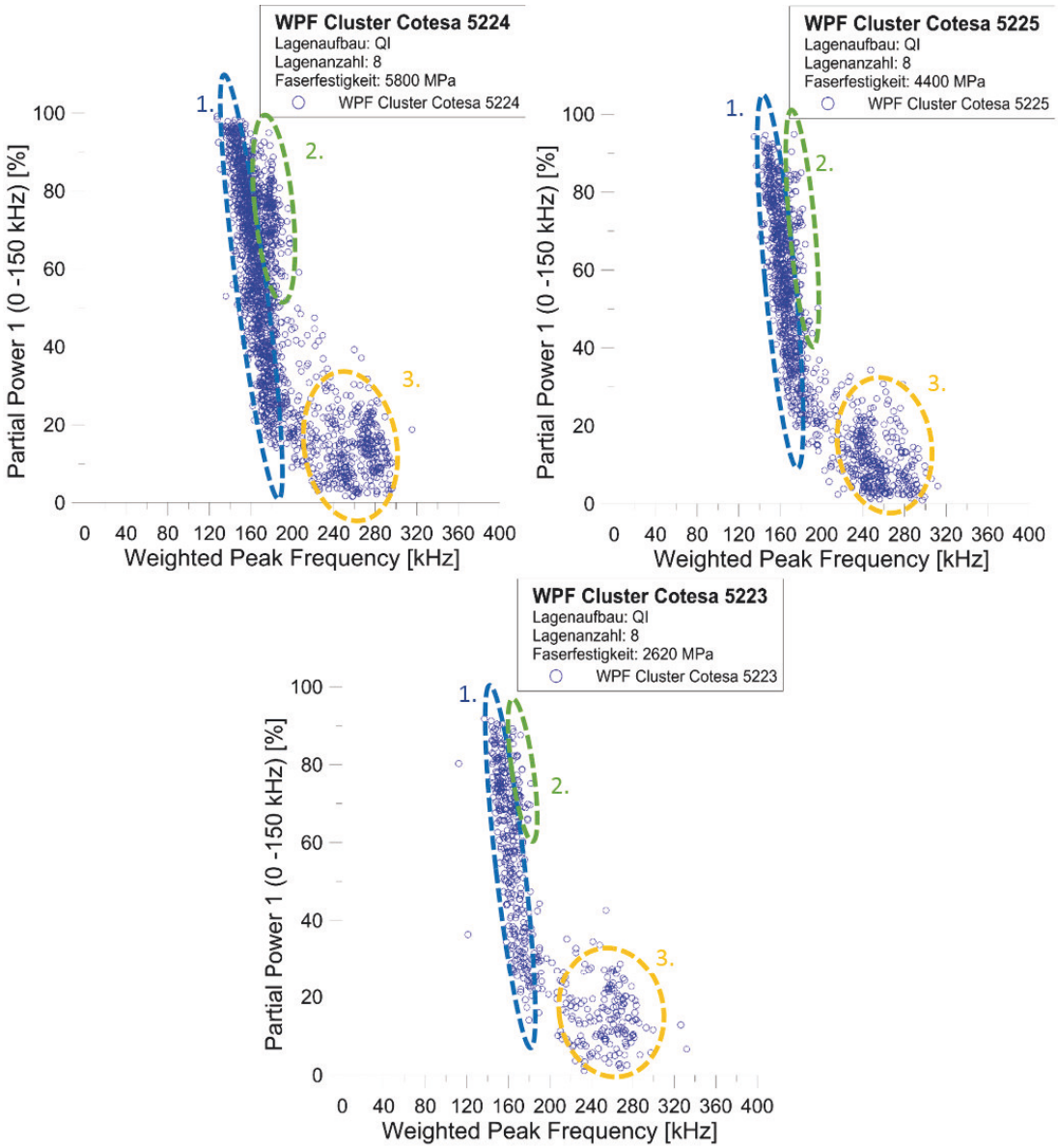


Abbildung 4.11-8: Ergebnisse der Zugproben COTESA 5223, 5224 und 5225; Cluster im WPF-PP1-Raum; Untersuchung zur Faserfestigkeit: COTESA-5224 5800MPa, COTESA-5225 4400 MPa, COTESA-5223 2620 MPa

Das dritte Cluster ist in allen drei Teilabbildungen klar und deutlich zu erkennen. Die Probenserie 5224 mit der höchsten Faserfestigkeit weist die meisten Ereignisse in diesem Cluster auf. Ähnlich wie in den 0/90° Proben kann dieses Verhalten durch die höhere Energie beim Versagen hochfester Fasern erklärt werden. Das dritte Cluster der Probenserie 5225 zeigt ein ähnliches Verhalten wie in der Darstellung der Probenserie 5224. Jedoch sind im Bereich um 280 kHz der gewichteten Vorzugsfrequenz weniger Signale verzeichnet worden. Die erreichte Maximalkraft der quasiisotropen Proben zeigt ebenfalls wieder größere Unterschiede zwischen den einzelnen Serien. So erreichten die Proben der Serie 5224 eine Kraft von $F_{max} \approx$ 12 kN, während die Proben der Serie 5225 einer Kraft von lediglich $F_{max} \approx 9$ kN standhielten. In der Probenserie 5223 liegt wiederum eine höhere Streuung in der erreichten Maximalkraft vor. So erreichte beispielsweise die Probe 5223-6 eine Kraft von $F_{max} = 12$ kN, während die im

Aufbau identische Probe 5223-4 lediglich F_{max} = 9,7 kN erreichte. So kann abschließend festgehalten werden, dass die Faserfestigkeit und somit die Festigkeit des gesamten Faserverbundes hauptsächlich die Ausbildung des dritten Clusters, welches für faserdominierende Schädigungsmechanismen steht, beeinflusst. Der stärkste Effekt wird bei diesem Vergleich in den erreichten Maximalkräften deutlich, die sich zum Teil um 10 kN zwischen der stärksten und schwächsten Faser unterscheiden. Die Ergebnisse der Schallemissionsmessung für die Proben mit verschiedenen Faserfestigkeiten zeigen ein sehr ähnliches Bild, welches von dem Lagenaufbau nur gering beeinflusst wird. Folglich zeigen Abbildung 4.11-6 und Abbildung 4.11-8 nahezu identische Clusterbildungen. In beiden Abbildungen ist die Faserfestigkeit durch die Ausbildung des dritten Versagensclusters erkennbar. Proben mit einer festeren Faser erzeugen dabei ein stärker ausgeprägtes Cluster als Probenserien mit schwächeren Fasern, sodass davon ausgegangen werden kann, dass Proben mit festeren Fasern vermehrt zu Faserbrüchen neigen. Diese gegensätzliche Aussage zur eingangs angenommenen Vermutung unterstreicht die Bedeutung solcher Untersuchungen. Die Ergebnisse der ±45° Proben sind von diesem Verhalten weniger beeinflusst, da die Faserfestigkeit in diesen Probenserien nicht so bedeutsam ist. Daher zeigt Abbildung 4.11-7 Abbildung 4.11-7 auch weniger Unterschiede in den Teilabbildungen als die Abbildungen zu anderen Lagenaufbauten.

Allgemein muss für die hier untersuchten Materialien festgehalten werden, dass die Faserfestigkeiten im Gesamtkontext erwartungsgemäß vergleichbar sind mit bisher genutzten Faserfestigkeiten in untersuchten Laminaten. So wurde bereits in den vom Autor induzierten und betreuten Abschlussarbeiten von Hönig [20] und Schreiber [45] Verbundwerkstoffe mit ähnlichen Faserfestigkeiten untersucht. In den Ergebnissen dieser untersuchten Materialien ist das Cluster, welches auf Faserversagen hinweist, zum Teil kleiner ausgebildet. Beispielshaft seien die Laminate 900-907 [20] mit einer Faserfestigkeit von 4300 MPa und die Laminate 961-969 [45] mit einer Festigkeit von 5490 MPa genannt. Beide Testreihen zeigten deutlich weniger Ereignisse im Bereich des dritten Versagensclusters als es in dieser Untersuchung der Fall ist. Gleichzeitig wurden weitaus mehr Ereignisse des Matrix- und Interface-Versagens registriert. Der Unterschied im Cluster des Interface-Versagens kann auf die unterschiedliche Faserdehnung bezogen werden. Während die beiden festeren Fasern eine Dehnung von 2% bzw. 1,8% besitzen, erreicht die schwächste Faser lediglich eine Bruchdehnung von 0,4%. Daher stellen sich in den Materialien mit den schwächsten Fasern weniger Reibvorgänge zwischen Faser und Matrix ein und folglich auch weniger Schallemissionssignale des zweiten Versagensclusters. Besonders deutlich wird dies in den Ergebnissen der Serie 5217 in Abbildung 4.11-6, in der kein zweites Cluster erkennbar ist.

Die Untersuchung hinsichtlich verschiedener Faservolumengehalte liefert in Abhängigkeit von der Laminatzusammensetzung unterschiedliche Ergebnisse. Die Ergebnisse der Proben mit 0/90° Lagenaufbau und ±45° Lagenaufbau zeigen eine gegenläufige Entwicklung. Während die 0/90° Proben mit abnehmendem Faservolumengehalt eine geringere Schallemissionsaktivität aufweist, ist dies in den Ergebnissen der ±45° Proben umgekehrt. Die Ergebnisse der quasiisotropen Proben zeigen für diese Analyse eine Kombination der Ergebnisse von Proben mit einem 0/90° und ±45° Lagenaufbau. Allerdings ist die Schallemissionsaktivität vergleichbar mit jener der 0/90° Proben.

Als abschließende Bewertung kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der Schallemissionsbildung bei den Untersuchungen mit variierendem Faservolumengehalt eine

Abhängigkeit vom jeweiligen Laminataufbau zeigen. Das erschwert eine Zuordnung zu einem bestimmten Schadensmechanismus. Beim Vergleich der einzelnen Probenserien zeigen die Ergebnisse der Serie 5229 und 5233 eine ähnliche Clusterbildung, obwohl sie in Lagenausrichtung und Faservolumengehalt vollkommen verschieden sind. Die Untersuchung zur unterschiedlichen Faserfestigkeiten liefert dagegen ein deutlicheres Ergebnis, auch wenn in dieser Versuchsreihe mit verschiedenen Matrixmaterialien gearbeitet werden musste. Es hat sich gezeigt, dass bei zunehmender Faserfestigkeit die Anzahl der Schallemissionssignale im dritten Cluster zunimmt, da durch die höhere Energie bei einem Faserriss einer festen Faser die unmittelbare Umgebung stärker geschädigt wird und somit mehr Fasern versagen.

Die Protokolle zur Faservolumenbestimmung und Materialdatenblätter zu den verwendeten Laminaten der Parameterstudie sind in Anhang Abbildung 60 bis Anhang Abbildung 62 zu finden.

4.12 Zusammenfassung der Ergebnisse auf Couponebene

In den Vorversuchen wurde die WPF-PP-Darstellung als Indikator zur Einordnung der verschiedenen Schädigungsmechanismen identifiziert. Die Clusterdarstellung der Schallemissionsparameter hilft bei der Trennung der verschiedenen Schädigungsmechanismen. Die deutlichste Clustertrennung stellte sich bei einer Probenkonfiguration von 4 Lagen (dünne Probe) schmal mit Taillierung ein. In diesem Fall wurden durch das gewählte Prüfregime alle Schädigungsmechanismen, denen eine gewichtete Vorzugsfrequenz zuzuordnen ist, erfasst. Des Weiteren wurde eine Parameterstudie (Kapitel 4.11) zum Einfluss auf die Clusterbildung mit verschiedenen Varianzen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen teilweise unterschiedliche Einflüsse auf die Bildung der Schädigungscluster.

Der finale Nachweis der verschiedenen Schädigungsarten, die den drei Schädigungsclustern zugeordnet werden, wurde durch die Versuchsreihe von zyklischen Zugversuchen, begleitet durch in-situ CT-Aufnahmen, erbracht. Delaminationen und Faser-Matrix Schädigungsmechanismen (Schädigungscluster eins und zwei) konnten nachgewiesen werden. Aufgrund der zu geringen Auflösung konnten Faserbrüche durch die in-situ CT-Aufnahmen nicht nachgewiesen werden. Es liegt jedoch nahe, dass die gemessenen Schallemissionsereignisse, die im dritten Cluster (faserdominierte Versagensmechanismen) angesiedelt waren, für ein tatsächliches Faserversagen in der Probe stehen, da diese Schallemissionen in einem Bereich der Probe gemessen wurden, die bei den CT-Darstellungen starke Schäden aufweisen, die nicht ausschließlich Matrixschäden zuzuordnen sind.

Hervorgehoben werden kann, dass unabhängig von der gewählten Probenspezifikation sich die unterschiedlichen Schallemissionscluster immer im selben Bereich der WPF-PP-Darstellung bilden. Dies und die reproduzierbaren Ergebnisse bei einem wiederholten Versuch mit derselben Probenspezifikation ist als eine Verifizierung der angewandten Messtechnik und der verwendeten Auswertealgorithmen für Schallemissionsprüfungen an Proben aus FVKs zu werten.

Nachfolgende Tabelle 4.12-1 fasst die Ergebnisse der Parameterstudie noch einmal qualitativ zusammen:

Parameter	Laminatsymmetrie	Einfluss auf Clusterausbildung
Faserfestigkeit	0/90; +-45; QI	Anzahl der Schallemissionssignale im dritten Cluster steigt mit höherer Faserfestigkeit
Matrixfestigkeit	0/90; +-45; QI	Anzahl der Schallemissionssignale im ersten Cluster steigt bei abnehmender Matrixfestigkeit
Faservolumengehalt	0/90	Anzahl der Schallemissionssignale steigt mit höherem Faservolumengehalt
	+-45	Anzahl der Schallemissionssignale sinkt mit höherem Faservolumengehalt
	QI	Mischform aus 0/90 und +-45° Verhalten
Varianz Lagenanzahl (4-lagig, 6-lagig)	0/90; +-45; QI	Kein merklicher Einfluss auf die Schallemissionsaktivität; alle drei Cluster werden gebildet
tailliert / nicht tailliert	0/90; +-45; QI	Höhere Schallemissionsaktivität bei nicht taillierten Proben und deutlichere Clusterbildung; jedoch alle Cluster bei den taillierten Proben vorhanden
tailliert 15mm Breite	0/90; +-45; QI	Höhere Schallemissionsaktivität bei schmaler, taillierter Probe und deutlichere Clusterbildung; alle Cluster vorhanden
tailliert 25mm Breite	0/90; +-45; QI	Geringere Schallemissionsaktivität bei breiter, taillierter Probe; alle Cluster vorhanden

Tabelle 4.12-1 Zusammenfassung Parameterstudie in Bezug auf Schallemissionsaktivität und Clusterbildung

5 Generalisierung und Übertrag auf Bauteile

5.1 Vorbetrachtung

Die dafür notwendigen Versuche wurden im Rahmen eines Porsche internen Entwicklungsprojektes an der IMA-Dresden (quasistatische Radbelastungsversuche), im EZW (dynamische Belastungsversuche BUP und Niederlaststeifigkeitsprüfstand) sowie bei der Firma Cotesa (Torsionsprüfversuche an CFK-Rohren) durchgeführt und in Porsche internen Berichten, Präsentationen, etc. [53] publiziert.

Die anhand der Couponversuche gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Zuordnung von unterschiedlichen Schallemissionsparametern zu verschiedenen Schädigungsmechanismen und der damit verbundene Zuwachs am Verständnis der Schädigungsmechanismen an FVKs im Allgemeinen, sollen nun auf Bauteilebene angewendet werden. Die Schallemissionsanalyse soll somit als ZfP-Verfahren bei prüfstandbasierten Belastungstests als Bewertungsverfahren qualifiziert werden, um das Verhalten von Bauteilen aus FVKs bei unterschiedlichen Belastungsregimen aufzulösen. Hier eignet sich die Schallemissionsanalyse sehr gut, da sie im Gegensatz zu den meisten bekannten ZfP-Verfahren nicht nur eine Momentaufnahme des Bauteilzustandes nach definierten Belastungsregimen aufzeigt, sondern während gewisser Prüfumfänge die Veränderungen im Bauteil mitmessen kann. Somit ist es möglich, den Schädigungsverlauf des Bauteils aufzuzeigen und die jeweiligen Schallemissionen mit den damit verbundenen Schädigungsmechanismen den jeweiligen Prüflasten zuzuordnen. Eine besondere Herausforderung besteht darin, die eingebrachten Schäden im Werkstoff der geprüften Bauteile mit niedrigen unterschiedlichen Prüflasten (Proof-Loads) nachzuweisen, die das Bauteil nicht weiter schädigen. Deshalb gibt es sowohl für die Universalprüfmaschine und die BUP spezielle, eigens für diese Prüfumfänge erzeugte, nicht schädigende Prüfprogramme. Die Schallemissionen im Proof-Load-Bereich sollen ebenfalls Aufschluss über den Zustand des Schädigungsgrades bringen. Gerade wenn die Schallemissionsanalyse als passives ZfP-Verfahren eingesetzt werden soll, darf das benötigte Lastregime zur Erzeugung von Schallemissionen das Bauteil nicht weiter schädigen und schwächen. Der Abgleich von Schallemissionscharakteristika bei hohen Lastregimen und beim niedrigen Proof-Load-Bereich sind somit vergleichend zu bewerten. In diesem Kapitel werden folglich die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse von quasistatischen und dynamischen Bauteilprüfungen mit unterschiedlicher Prüflastintensität dargestellt, verglichen und diskutiert. Dies erfolgt in zwei Schritten:

- Übertrag der Erkenntnisse von Couponebene auf einfach gestaltete rotationssymmetrische Bauteile in Kapitel 5.3.1.1 und 5.3.2.1
- Übertrag der Erkenntnisse von einfach gestalteten rotationssymmetrischen Bauteilen auf komplexe rotationssymmetrische Bauteilstrukturen in Kapitel 5.3.1.2 und 5.3.2.2

Schritt eins ist der Übertrag der Erkenntnisse aus den Couponversuchen mit einer Versuchsreihe an einem geflochtenen Rohr aus kohlenstoffverstärktem Kunststoff. Dies ist in Bezug auf die bereits schon teilweise erfolgte Werkstoffsubstitution bei Antriebswellen und Achswellen für die Anwendung im Automobilsektor naheliegend. Schritt zwei ist eine Versuchsreihe mit einem komplexen rotationssymmetrischen Bauteil. Hierzu wurden CFK-Räder aus FVK als Demonstratorbauteile ausgewählt. Die Möglichkeit, Räder aus FVKs für gewisse Versuchsreihen zu verwenden und die jeweiligen Schallemissionen vergleichend zu bewerten, ist für die Qualifizierung der Messmethode ein weiterer wichtiger Abgleich.

5.2 Unterschied zwischen Coupon- und Bauteilprüfung

Wie in Kapitel 3.3.1 Besonderheit der Schallemissionsmessung an komplexen Strukturen/Bauteilen bereits erläutert wurde, wird mit zunehmendem Abstand der Schallemissionsquelle zum Schallaufnehmer die Dämpfungsintensität (stärkere Dämpfung der höheren Frequenzanteile) größer. Dies ist vor allem für die Analyse der erfassten Schallemissionen zu berücksichtigen, da bei frequenzabhängigen Schallemissionsparametern das Wegfallen der höherfrequenten Anteile zu einer fehlerhaften Interpretation der Parameter führen kann. Die Einteilung und Zuordnung der verschiedenen Schädigungsmechanismen zu den verschiedenen WPF-Clusterbereichen sieht an dieser Stelle für niederfrequente Schallereignisse matrixdominierte Schädigungsmechanismen und für höherfrequente Schallereignisse faserdominierte Schädigungsmechanismen vor. Diese Annahme ist anhand der Untersuchungsergebnisse von Sause im Labormaßstab [37] und anhand der Ergebnisse auf Couponebene der hier vorgestellten Arbeit, nachgewiesen. Nun soll der Übertrag der aus den Couponversuchen gewonnenen Erkenntnisse auf komplexere Strukturen vollzogen werden. Es genügt dabei nicht, bei der Messkonfiguration die Verstärkung der Messgeräte zu erhöhen, da sonst die Signale übersteuern und die Amplituden teilweise beschnitten werden. Dies ist für frequenzschwache Signale mit hoher Amplitude (stehen für matrixdominierte Schadensmechanismen) genauso wie für frequenzstarke Signale mit kleiner Amplitude (stehen für faserdominierte Schädigungsmechanismen) gleichermaßen ungünstig in der Signalermittlung. Somit ergeben sich hauptsächlich zwei Anforderungen für eine erfolgreiche Schallemissionsmessung an komplexen Bauteilen. Eine große Anzahl von Schallaufnehmern in einem gleichmäßig verteilten Netz, wobei die Abstände der unterschiedlichen Schallaufnehmer möglichst gleich groß sein sollen. Dadurch ist gewährleistet, dass bei der Bearbeitung und Analyse der Signale keine unterschiedlichen Parametersätze verwendet werden müssen. Im Idealfall gelingt es, das dreidimensionale Bauteil vereinfacht in einen 2D-Plot umzuwandeln, um danach die Positionen der Schallaufnehmer mit gleichen Abständen umzusetzen. Zusätzlich ist, wie bereits erwähnt, die Dynamik des Messsystems das Hauptkriterium für die Erfassung aller relevanten Frequenzen unter Berücksichtigung der materialabhängigen Dämpfung in komplexen Strukturen.

5.3 Testaufbau und –durchführung

5.3.1 Zerstörende Tests

5.3.1.1 Ermüdungsprüfstand Rohre

Die weniger komplexen, rohrartigen, geflochtenen Demonstratorbauteile werden auf einem Torsionsprüfstand der Firma SincoTec für CFK-Antriebswellen belastet. Es handelt sich im Detail um einen servopneumatischen Ermüdungsprüfstand zur Prüfung von Bauteilen mit Spiel und / oder hoher Dämpfung und auch für mehraxiale Prüfungen. Es sind dynamische und statische Prüfungen auf diesem Prüfstand möglich. Der Prüfstand (siehe Abbildung 5.3-1) ist mit einem Winkelsensorsystem von 180° bis -180° ausgestattet. Bei dynamischen Prüfungen kann über den Drehmomentaufnehmer von 0 bis 500 Nm und bei statischen Prüfungen von 0 bis 4000 Nm gemessen werden. Die Prüfgeschwindigkeit liegt maximal bei 2Hz, 180°. Bei der Einspannung der Prüflinge ist darauf zu achten, dass keine Spannungsspitzen und somit Beschädigungen im Prüfling wie beispielsweise Brüche in oder in der Nähe der Momenteneinleitung auftreten. Für validierbare und reproduzierbare Ergebnisse muss das Versagen des Prüflings im „ungestörten“ Bereich sein. Folglich muss die laterale Lage der

einzelnen Schädigungsereignisse mit dem längsbezogenen Verdrehungswinkel korrespondieren. Die Verdrehung nimmt dabei vom Antrieb zur Gegenhalterung (Widerlager) hin ab und es ist erst bei hohen Torsionskräften mit Schäden bis hin zum Kollabieren des Prüflings am Widerlager zu rechnen.

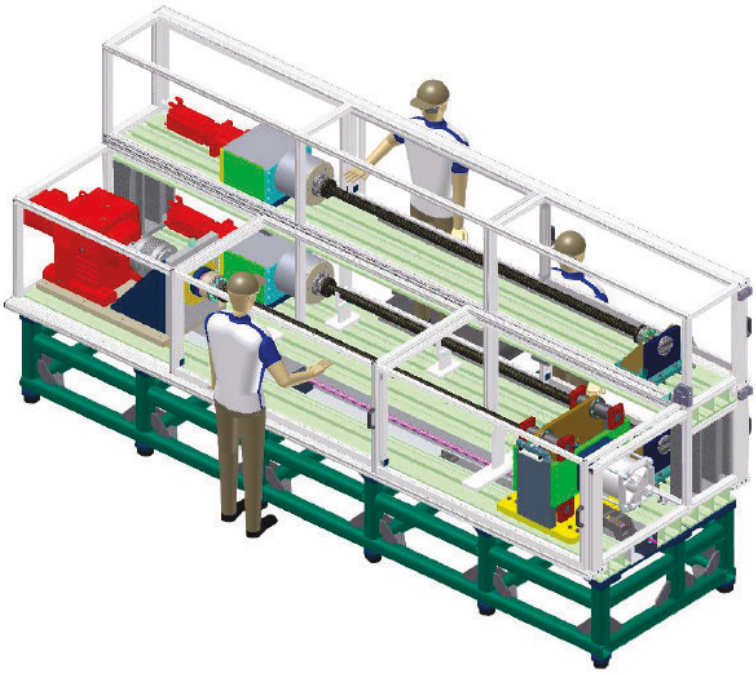


Abbildung 5.3-1 Ermüdungsprüfstand (www.sincotec.de, Abruf 2016)

Die Rohre haben einen Außendurchmesser von 80 mm und eine Länge von 360 mm. Es wurden je drei achtlagige Rohre mit den Lagenaufbauten 0/90°, ±45° und einem quasiisotropen Lagenaufbau untersucht. Bei jeder Prüfung wurden acht Schallemissionssensoren auf den Prüfrohren an zuvor definierten Positionen reproduzierbar appliziert (siehe Abbildung 5.3-2). Auf der linken Seite des Rohrs befindet sich der Antrieb und auf der rechten Seite das Widerlager. Die Befestigung der Schallemissionssensoren wird über Schnellspannzwingen realisiert.

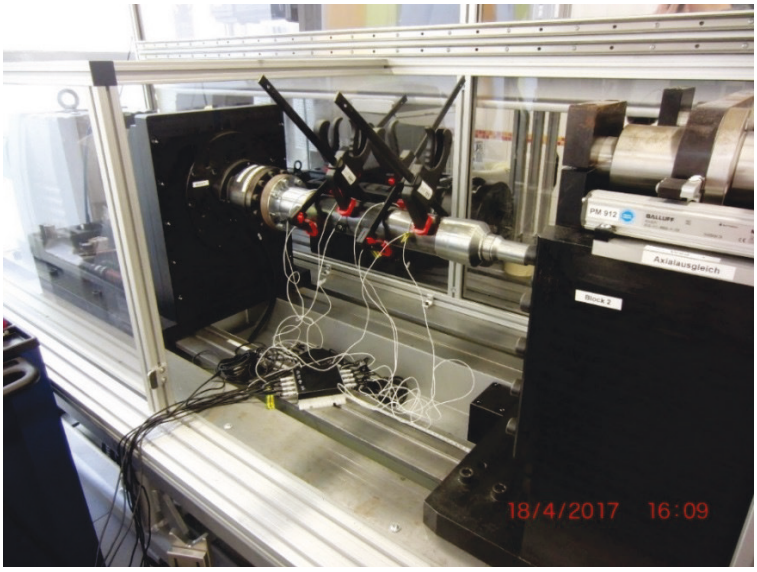


Abbildung 5.3-2 Messaufbau am Torsionsprüfstand der COTESA GmbH

Eine mögliche Ursache für ein frühzeitiges und damit untypisches Versagen können herstellungsbedingte lokale Fehlstellen wie beispielsweise Faserondulationen, Matrixarmut und eine damit verbundene schlechtere Anhaftung der Faserlagen im Verbund sein. Wie bei den Versuchsreihen auf Couponebene erfolgen bei allen Prüfumfängen an den Demonstratorbauteilen an allen Sensorpositionen Messungen zur Ankopplungsgüte und Funktionstüchtigkeit der Schallemissionsaufnehmer. Hierfür wird der beschriebene HSU-Nielsen-Test durchgeführt. Neben dem Einfluss der Dispersion der geführten Wellen, d.h. der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von der Frequenz der Wellenmoden, besteht in dem mehrlagig aufgebauten Verbundwerkstoffmaterial zusätzlich eine starke Winkelabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit. Die Schallgeschwindigkeit wird durch die Gelegeorientierung im Laufweg der akustischen Welle beeinflusst. Dabei wird der schnellere Wellenmode S_0 stärker beeinflusst als der A_0-Mode [22], was eine Lokalisierung mit einer einheitlichen A_0-Mode-Geschwindigkeit erlaubt. Für eine möglichst exakte Ortung der Schallemissionsquelle in diesem Bauteil, wurden die hochfrequenten symmetrischen Wellenmoden durch einen dynamischen Bandfilter eliminiert. Die CFK-Rohre wurden ausschließlich zyklisch mit einem einseitigen Torsionsmoment belastet. Die Varianz der Zyklenanzahl und die Höhe der Lastzyklen waren lagenaufbauabhängig unterschiedlich.

Für die Versuchsreihen an den komplexeren Demonstratorbauteilen, den Rädern aus CFK, wird auf eine große Universalprüfmaschine zurückgegriffen. Um den Schädigungseintrag radspezifisch abzubilden werden auf einer Biegeumlaufprüfmaschine zusätzliche Versuchsreihen durchgeführt. Beide Prüfstände werden nachfolgend näher erläutert. Bei der Universalprüfmaschine ist es möglich, ähnliche quasistatische Versuchskonfigurationen anzuwenden wie bei der Ergebnisgenerierung an den Couponproben. Für die Biegeumlaufprüfung hingegen wird ein dynamisches Lastregime in das Bauteil eingeleitet und es entstehen unmittelbar neue Herausforderungen an die Schallemissionsmesstechnik. Die Instrumentierung der Demonstratorbauteile mit Sensoren war bei den unterschiedlichen prüfstandsgebundenen Tests je nach Demonstratorbauteil dieselbe. Das Instrumentierungskonzept wurde hinsichtlich kurzer Applikationsdauer und deren Reproduzierbarkeit entwickelt. Es war zwingend sicher zu stellen, dass die Sensoren immer an derselben Position angebracht wurden. Im Anhang Tabelle 15 ist die Entwicklung der Sensorapplikation dargestellt. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse. In Abbildung 5.3-3 ist die Positionierung der Schallemissionssensoren schematisch dargestellt. Im Felgenbett ist hier die Variante mit geklebten Sensorjochs dargestellt, die im Laufe der Untersuchungen durch Sensorbänder ersetzt wurden, um die Handhabung zu verbessern. Die Sensoren auf den Speichen wurden mit einer Art Sensorschraubzwinge befestigt. Die gleichbleibende Positionierung wurde mit Montagehilfen, die die Abstände definieren, sichergestellt.

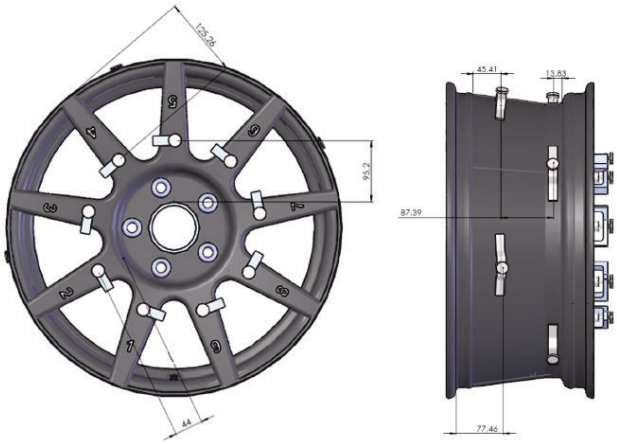


Abbildung 5.3-3 Anordnung der Schallemissionssensoren am CFK-Rad

Wie bei den Versuchsreihen auf Couponebene und auf den CFK-Rohren erfolgte bei allen Prüfumfängen an den Demonstratorbauteilen an allen Sensorpositionen Messungen zur Ankopplungsgüte und Funktionstüchtigkeit der Schallemissionsaufnehmer (HSU-Nielsen-Test). Für eine möglichst exakte Ortung der Schallemissionsquelle an diesem Bauteil wurden die hochfrequenten symmetrischen Wellenmoden durch einen dynamischen Bandfilter eliminiert. So wurde für die Ortung der amplitudenstarke, niederfrequente Wellenmode A_0 mit einer gemittelten Geschwindigkeit von 1500 m/s verwendet. Nachfolgend werden die grundlegend verschiedenen Prüfverfahren unter schallemissionsspezifischen Belangen beschrieben.

5.3.1.2 Räderprüfung auf der Universalprüfmaschine

Die wechselnde quasistatische Last wurde auf die Räder mit einer speziell gefertigten Bauteilhalterung und einem Lasteinleitungselement eingebracht. Die Krafteinleitung der Belastungstests erfolgte über einen formgefrästen gummibelegten Hartholzadapter mit einem Sturzwinkel von 30° über ca. 80° des Radumfangs am Innenhorn. Die Radschrauben wurden über einen Stahladapter (Bauteilaufnahme) mit der Maschine verbunden. Der eingestellte Sturzwinkel von 30° ermöglichte eine Art der Krafteinleitung in das Rad, welche die Richtung der Kraft bei maximaler Querbeschleunigung nachbilden soll (Abbildung 5.3-4).

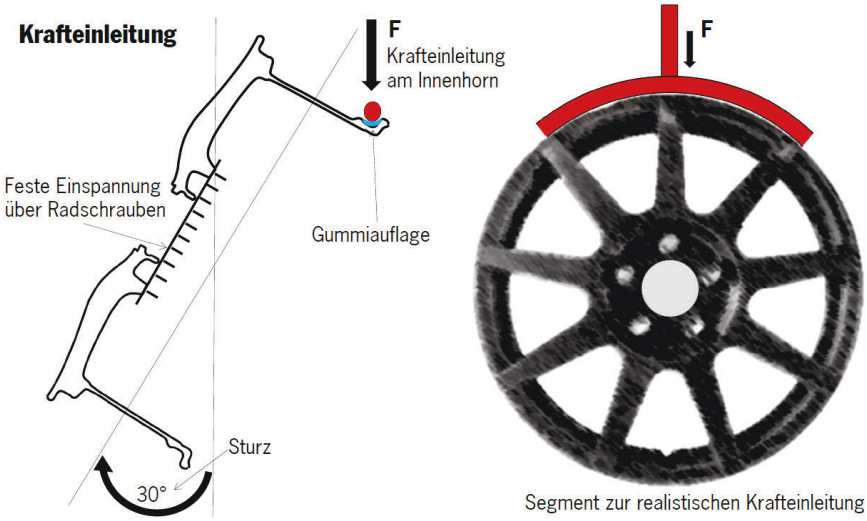


Abbildung 5.3-4 Schematische Darstellung des Aufspannwinkels und der umlaufenden Krafteinleitung

In nachfolgender Abbildung 5.3-5 ist ein mit allen Sensoren instrumentiertes Demonstratorbauteil auf der Universalprüfmaschine montiert abgebildet. Der Stahladapter zur Bauteilmontage auf der Prüfmaschine ist dabei so ausgelegt, dass sich das Rad ohne Lösen der Radschrauben auf dem Adapter drehen lässt. Dies ist vor allem bei quasistatischen Messreihen an unterschiedlichen Stellen des Bauteils hilfreich. Das Demonstratorbauteil wird folglich maximal zweimal nach der Erstaufspannung weitergedreht, um eine komplett umlaufende, sequentielle Lasteinleitung zu realisieren.

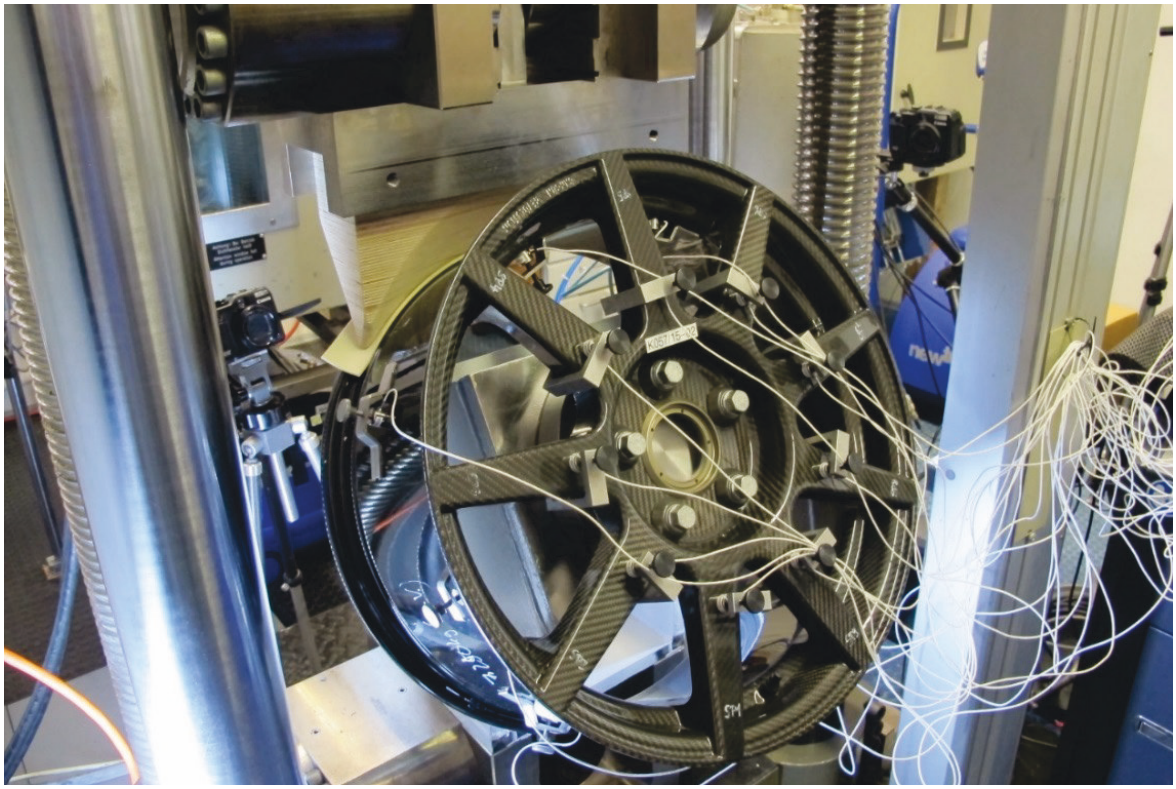


Abbildung 5.3-5 Befestigung AE-Sensoren mittels Joch und Rändelschraube im Bett- und Speichenbereich

Das Demonstratorbauteil wurde ausschließlich zyklisch auf Druck belastet. Die Varianz der Zyklenanzahl und die Höhe der Lastzyklen waren bauteilbedingt unterschiedlich.

5.3.1.3 Radprüfung auf Biegeumlaufprüfmaschine

Die verwendete Biegeprüfanlage BUP 760 von Makra ist eine Prüfmaschine, die zur stationären Ermüdungsprüfung mit einem rotierenden Fliehgewicht bei Fahrzeugrädern eingesetzt wird und gehört bei der Raderprobung zu den Standardprüfverfahren. Es können Räder mit Nenndurchmessern von 10“ bis 28“ und einer Nennbreite von 3“ bis 14“ geprüft werden. Dabei werden umlaufend Seitenkräfte in das Rad eingebracht und simuliert, die bei Kurvenfahrten und Querbeschleunigungen in das Rad einwirken. Die Speichenkonstruktion der Räder wird hierbei sehr stark belastet. Die Radfelge wird mit dem Tisch des Prüfstandes fest fixiert und über die Verschraubungsfläche der Radnabe oder des Radnabenadapters mit dem Biegemoment M_b belastet. Die Formel zur Berechnung des Biegemomentes für Personenkraftwagen und Geländewagen lautet:

$$M_{b\,max} = S\,F_v(\mu\,r_{dyn} + d)$$

Formel 5.3-1 Biegemoment Biegeumlaufprüfung

Dabei stehen die Formelzeichen für:

- $M_{b\,max}$ = maximales Bezugsbiegemoment (Nm)
- F_v = maximale Radlast (N)
- r_{dyn} = dynamischer Reifenhalbmesser des größten für das Rad empfohlenen Reifen (m)
- d = Einpresstiefe (m)
- μ = Reibwert
- S = Sicherheitsfaktor

Die verwendeten Radmuttern oder Radschrauben müssen mit den vom Fahrzeughersteller angegebenen Verschraubungsrichtlinien angezogen werden und nach 10000 Lastwechseln nachgezogen werden. Gemäß der Räderrichtlinie ECE-R 124 werden die Biegeumlaufprüfungen bei zwei verschiedenen Prozentwerten des maximalen Biegemomentes durchgeführt. Bei einer Steigerung des Prüfmomentes um mehr als 10 % im Gegensatz zur Referenzmessung der Erstbegutachtung muss das komplette Prüfprogramm wiederholt werden. Am nicht drehbaren Tisch sind die starren Fixierungen des Prüflings auf dem Prüfstand zu erkennen und die Momenteneinleitung mit dem Torsionsstab im Radzentrum durch die Radnabe ist ebenfalls gut ersichtlich. Es ist zwingend darauf zu achten, dass die Prüfmaschine mit dem montierten und fix verspannten Prüfling nicht in der Resonanzfrequenz betrieben wird. Speziell wenn die Umlaufbiegeprüfung mit einer sensiblen Messtechnik wie die der Schallemissionsanalyse ausgestattet ist, können Störsignalen eingebracht werden und die Messung muss eventuell wiederholt werden. Ursachen für die Störsignale können aus der Steuerung der Umlaufbiegemaschine kommen oder z.B. die Resonanzfrequenz liegt im selben Frequenzbereich wie die der Schallemissionen.

Es wurde mit unterschiedlichen Versuchskonfigurationen geprüft, um die verschiedenen Schädigungszonen und deren Zeitpunkte des Erstauftretens zu ermitteln und mit den Schallemissionsparametern zu verifizieren. Die verschiedenen Versuchskonfigurationen und deren Ergebnisse werden in Kapitel 5.4 näher erläutert und diskutiert.

5.3.2 Zerstörungsfreie Tests

Es wurden zerstörungsfreie Tests an den Demonstratorbauteilen auf drei verschiedenen Prüfmaschinen durchgeführt. Neben den beschriebenen Tests im Proof-Load-Bereich wurde ein zusätzlicher Test durchgeführt, der nachfolgend beschrieben wird. Auch bei dieser Versuchskonfiguration werden die Demonstratorbauteile nicht mit der eingebrachten Last geschädigt.

5.3.2.1 Rohrprüfung im Niederlastbereich

Die ursprüngliche Versuchsplanung für die mit der Schallemissionsprüfung begleiteten Torsionstests sah analog zu den quasi-statischen Belastungstest der Räder ebenfalls Prüfzyklen im Niederlastbereich (kleine Lastmomente) vor. Die ersten Auswertungen von im schädigenden Lastbereich geprüften Rohren zeigte jedoch, dass annähernd keine Schallemissionsaktivitäten unterhalb des zuvor beaufschlagten Lastniveau detektiert werden konnten. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bei Torsionsbelastung nur eine geringe Anzahl an niederfrequenten, durch Reibungsvorgänge initiierten Bursts beobachtet wurde. Folglich ist das Felicity-Ratio bei dieser Art Versuchskonfiguration nicht als Schadensindikator nutzbar. Dies wird durch nachfolgende

exemplarische Abbildung 5.3-6 deutlich, bei der die gemessenen Schallemissionssignale (blaue Kreuze) fast ausschließlich oberhalb der zuvor angefahrenen Lastzyklen zu finden sind.

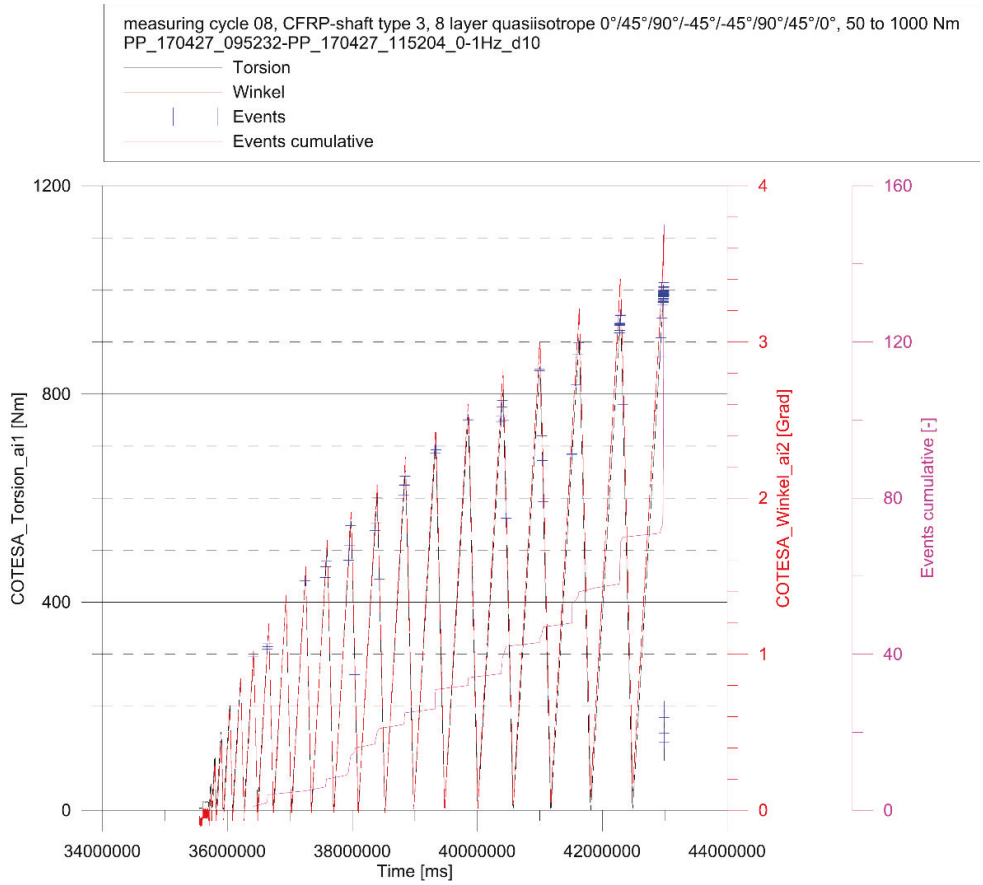


Abbildung 5.3-6 Geortete AE-Ereignisse (Events) im Drehmomentverlauf, kumulative Event-Anzahl eines CFK-Rohrs mit quasiisotropem Lagenaufbau bei der Torsionsprüfung

Des Weiteren wird diese These durch folgende Abbildung 5.3-7 deutlich. Es ist zu erkennen, dass sich das Felicity-Ratio nicht unterhalb des Wertes 1 einpendelt. Das hat zur Folge, dass es keine signifikante Schallemission unterhalb des zuvor beaufschlagten Moments gibt.

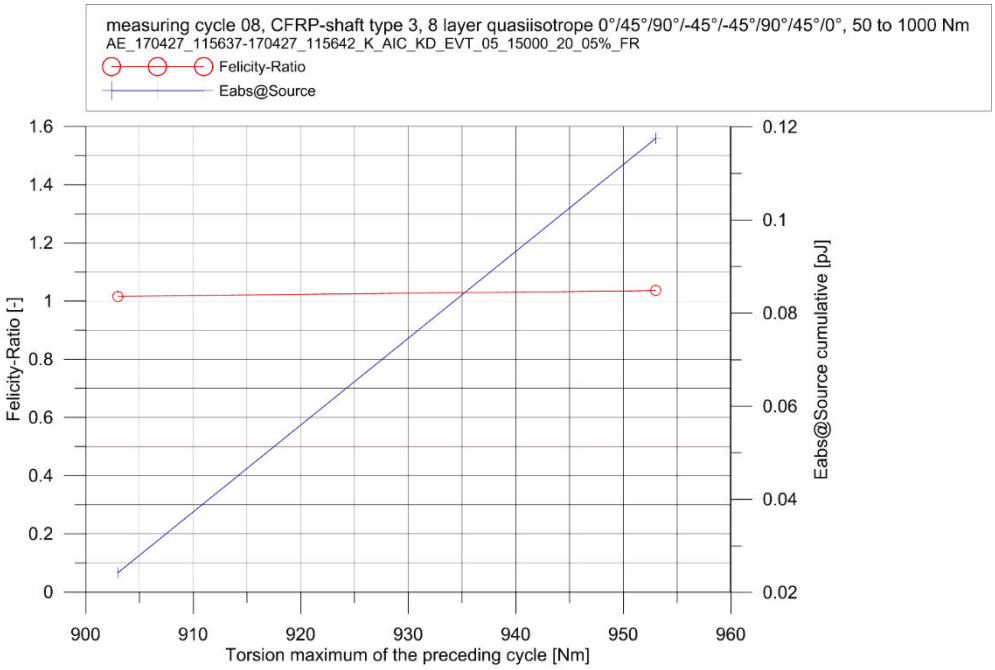


Abbildung 5.3-7 Felicity-Ratio und/ oder kumulative Burstenergie als nicht aussagekräftiger Schadensindikator eines CFK-Rohrs mit quasiisotropem Lagenaufbau bei der Torsionsprüfung

Aufgrund der fertigungsbedingten (Flechten), verhältnismäßig langen Faserlängen in den Rohren ist im Vergleich zu den Grundlagenuntersuchungen auf Probenebene mit, der Probengeometrie geschuldeten, kurzen Faserlängen, eine andere Spannungsverteilung im Prüfling vorherrschend. Vor allem die Prüflinge mit einem ±45°- Lagenaufbau weisen ein sehr hohes Bruchtorsionsmoment auf, was auf einen Zugspannungszustand schließen lässt. Dies führt zu einem schlagartigen Versagen der Wellen in Kombination mit kaum durch die Schallemission messbaren Schallemissionen bis zum Zeitpunkt des Versagens. Unterstützt wird das durch den Flechtprozess bei der Herstellung, der potentielle Faserondulationen vermeidet, und somit Reibgeräusche bei vorgeschädigten Bauteil im Werkstoff eliminiert, die aufwachsende Schädigungen hinweisen können und von der Schallemissionsmesstechnik erfasst werden könnten.

5.3.2.2 Radprüfung im Niederlastbereich

Die Demonstratorbauteile wurden auf einer Art Rädermessstand sowohl axial als auch radial an mehreren Punkten mit niedrigen Prüflasten auf Druck beansprucht. Dies ermöglicht das zu prüfende Rad umlaufend mit definierten Drucklasten zu beaufschlagen. Das Rad wird dabei auf einer biegesteifen Vorrichtung mit den Radschrauben oder Radmuttern, die auch am Fahrzeug verwendet werden, verschraubt. Durch eine in zwei Richtungen verstellbare Kraftachse können prinzipiell alle relevanten Punkte des Rades mit Hilfe eines elektromechanischen Zylinders mit einem Zylinderhub von ca. 95mm und den daran montierbaren unterschiedlichen Prüfstempeln angefahren werden. Zusätzlich ermitteln einstellbare Wegaufnehmer die Verformung des Prüflings. Das Messsystem besteht aus einer Kraftmessdose mit einem Messbereich von ±12kN, die in der Baugruppe des elektromechanischen Kraftzylinders integriert ist. Die Nabenadapter sind dabei selbst mit einer Zentralschraube verspannt. Zwischen den Messzyklen kann diese gelöst und das Rad mit geschlossener Zentralmutter gedreht werden. Somit ist bei einer Messreihe an einem Rad die eigentliche Verschraubung unverändert und die Messung frei von etwaigen Störeinflüssen, die beim Verschrauben des Rades auf der Nabe entstehen können.

Der Prüfstand wird kraftgesteuert betrieben. Die folgende Abbildung 5.3-8 soll die Arbeitsweise des Prüfstandes näher erläutern.

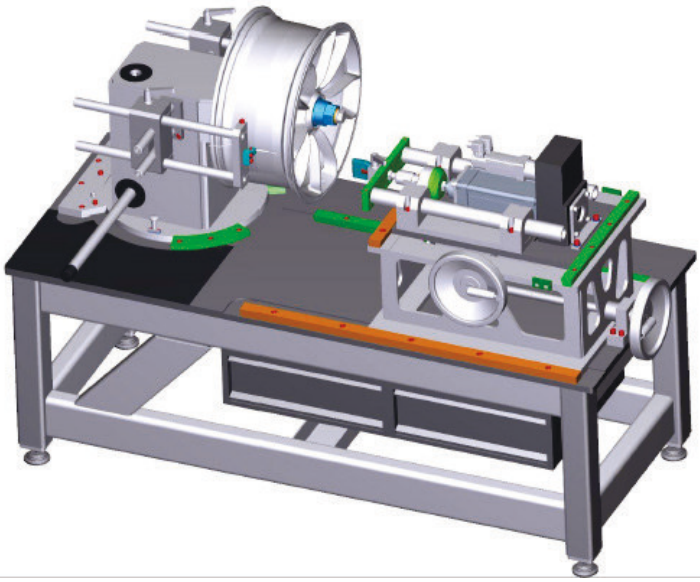


Abbildung 5.3-8 Radmessstand mit Zentralverschlussaufnahme [53]

Dabei ist darauf zu achten, dass die Positionierung der Druckstempel je nach Versuchskonfiguration immer an derselben Position des Rades ist. Das gilt ebenfalls für die Positionierung des Wegaufnehmers. Mit einer zu großen Varianz bei der krafteinleitenden Position und bei der Aufnahme der Verformung im Rad werden die Messwerte unbrauchbar. Dies ist besonders der Fall, wenn bei Versuchsreihen die Verformungsänderung des Rades eine elementare Rolle bei der Ermittlung von Kennwerten spielt und nicht nur über den Druckstempel kleine Kräfte in das Rad eingeleitet werden sollen, um die potentiellen Schallemissionen zu provozieren. Mit einer reproduzierbaren Positionierung des Wegaufnehmers und des krafteinleitenden Druckstempels können Aussagen bezüglich des Steifigkeitsabfalles im Bauteil in axialer und radialer Bauteilachse getätigt werden. In Kombination mit den Schallemissionssignalen nach definierten, vorangegangenen Belastungszyklen können Schädigungszonen erkannt werden und darüber hinaus in den stärker geschädigten Zonen über den Abgleich der Schallemissionsparameter Aussagen zum Schädigungsgrad des Werkstoffes erfolgen.

5.4 Ergebnisse

Die Untersuchungen auf Couponprobenebene, speziell im Kapitel 4.10 Zusammenfassung in-situ-Versuche, zeigten, dass die Entwicklung der spezifischen Schädigungsarten in den unterschiedlich stark geschädigten Bereichen der Prüflinge erkannt wird. Somit ist der Nachweis erbracht worden, dass sich der zeitliche und räumliche Verlauf der z.B. Mikrorissbildung durch die dementsprechenden Schallemissionsparameter darstellen lässt. Zu den essentiellen Parametern sind der Quellort, die Burstenergie am Quellort, die Schallemissionsrate und die gewichtete Vorzugsfrequenz inklusive der Partiellen Leistung als Indikator für die verschiedenen Schädigungsmechanismen zu nennen. Diese Parameter werden auch bei der Auswertung der Schallemissionssignale, die bei den Versuchsreihen auf den Demonstratorbauteilen gemessen wurden, ausgewertet. Ziel war es, die Schallemissionsanalyse als prüfstandsbegleitendes Bewertungsverfahren zur Bestimmung der Strukturintegrität und des

Bauteilzustandes der Demonstratorbauteile mit den beschriebenen Versuchen zu validieren. Dazu wurden Schallemissionsparameter in repräsentativem Umfang untersucht und die Abhängigkeit der Parameter von den eingetragenen Lastkollektiven auf die Demonstratorbauteile ermittelt. Die Ziele der Lasteinbringung waren verschieden und fanden, wie der nachfolgenden Aufzählung zu entnehmen ist, auf unterschiedlichen Prüfständen statt.

- Cotesa-Torsionsprüfstand zur Einbringung definierter, rampenförmiger, zyklischer hoher und niedriger Prüflasten (Proof-Torques) mit dem Ziel der Validierung des Felicity-Ratios und der Übertragung des Ratios auf Proof-Torques.
- Universalprüfmaschine zur Einbringung definierter, rampenförmiger, zyklischer hoher und niedriger Prüflasten (Proof-Loads) mit dem Ziel der Validierung des Felicity-Ratios und der Übertragung des Ratios auf Proof-Loads.
- Schallemissionsmessungen begleitend zur Biegeumlaufprüfung. Ziel ist die Untersuchung und der Abgleich der Schalemissionsereignisse, die während der BUP und während der nachgeschalteten Steifigkeitsmessung am Steifigkeitsprüfstand erfasst wurden.
- Verwendung des Biegeumlaufprüfstandes zum Anschwingen der Bauteile im Niederlastbereich (nicht schädigend) zwischen den eigentlich schädigenden Prüfzyklen und paralleler Schallemissionsmessung. Ziel ist es, die Biegeumlaufprüfung um Proof-Loads aus Zeit- und Kostengründen zu erweitern.

Wie bereits beschrieben ist ein Übertrag der bei den Couponversuchen erarbeiteten Erkenntnisse auf die Anwendung der Schallemissionsanalysen bei komplexeren größeren Geometrien nur mit dementsprechenden bauteilangepassten Ermüdungsversuchen möglich, die das Lastkollektiv- und Szenario maßgeblich bestimmt und einen Einfluss auf die Schadensentwicklung hat. In komplexeren Bauteilen können bei der Schadensentwicklung und beim Schadensfortschritt „Lastumlagerungen“ auftreten. Diese „Lastumlagerungen“ führen zu Belastungen im Bauteil in anderen Bereichen und sie verändern sich sowohl örtlich als auch von ihrer Intensität über den Prozess der schädigenden Belastung. Somit sind der Ort und der Zeitpunkt der Schadensentwicklung von großer Bedeutung.

5.4.1 Ergebnisse Rohrprüfung

Zur Erfassung von Schädigungsverläufen von CFK-Rohren, wurden mehrere Versuchsreihen und Messkampagnen mit tordierenden Belastungsregimen auf einem Torsionsprüfstand für Wellen durchgeführt und mit der Schallemissionsmessung begleitet. Dabei wurden die Prüfstandsparameter Torsion [Nm] und Drehwinkel [°] als analoge Spannungskenngrößen erfasst. Die Versuche wurden zyklisch, laststeigernd und lastabfallend bis zum Versagen der Bauteile durchgeführt. Das maximale Torsionsmoment stellt somit das Moment dar, bei dem der Prüfling versagte. In nachfolgender Tabelle 5.4-1 ist eine Übersicht der geprüften CFK-Rohre und deren Versuchsdurchführung dargestellt. In diesem Kapitel werden je Lagenaufbau eine Versuchsreihe diskutiert, da sich die Versuchsergebnisse lagenaufbauabhängig reproduzierbar in vergleichbarer Weise eingestellt haben.

Laminataufbau	Messzyklus/Welle	Einzelzyklus	Torsion min [Nm] (5s)	Torsion max [Nm] (5s)	Schrittweite Rampen [Nm]	Anzahl Rampen	Belastung [Nm/s]	Entlastung [Nm/s]	Druckbruch bei Torsion [Nm]
0°/90°, 8 Lagen	1	1	10	200	10	20	2	5	
0°/90°, 8 Lagen	1	2	210	280	10	8	2	5	
0°/90°, 8 Lagen	1	3	50	750	50	15	2	5	750
0°/90°, 8 Lagen	2	1	50	750	50	15	2	5	750
0°/90°, 8 Lagen	3	1	-580	90	Fehlerhafter Lastverlauf, Welle kurz nach Start zerstört				
+45°/-45°, 8 Lagen	4	1	30	230	10	21	2	5	
+45°/-45°, 8 Lagen	4	2	240	380	10	15	2	5	
+45°/-45°, 8 Lagen	4	3	20	840	20	42	2	5	
+45°/-45°, 8 Lagen	4	4	100	1100	100	11	2	5	1100
+45°/-45°, 8 Lagen	5	1	50	1150	50	23	2	5	1150
+45°/-45°, 8 Lagen	6	1	50	1100	50	22	2	5	1100
quasiisotrop, 8 Lagen	7	1	50	1000	50	20	2	5	1000
quasiisotrop, 8 Lagen	8	1	50	1000	50	20	2	5	1000
quasiisotrop, 8 Lagen	9	1	50	1000	50	20	2	5	1000

Tabelle 5.4-1 Übersicht Versuchsdurchführung Torsionsprüfung

Auffallend ist, dass je nach Lagenaufbau das Torsionsmoment beim Versagen der Rohre annähernd identisch ist. Dies lässt auf einen sehr hohen Fertigungsstandard schließen, der kaum herstellungsbedingte Fehler zulässt, und eine gute Faser-Matrix-Haftung garantiert. In der folgenden Abbildung 5.4-1 sind die einzelnen, georteten Schallemissionsereignisse (Einzelevents als blaue Kreuze), der kumulierten Anzahl der Events (magenta), dem Winkel und den Torsionszyklen eines CFK-Rohres mit 0°/90° Lagenaufbau dargestellt.

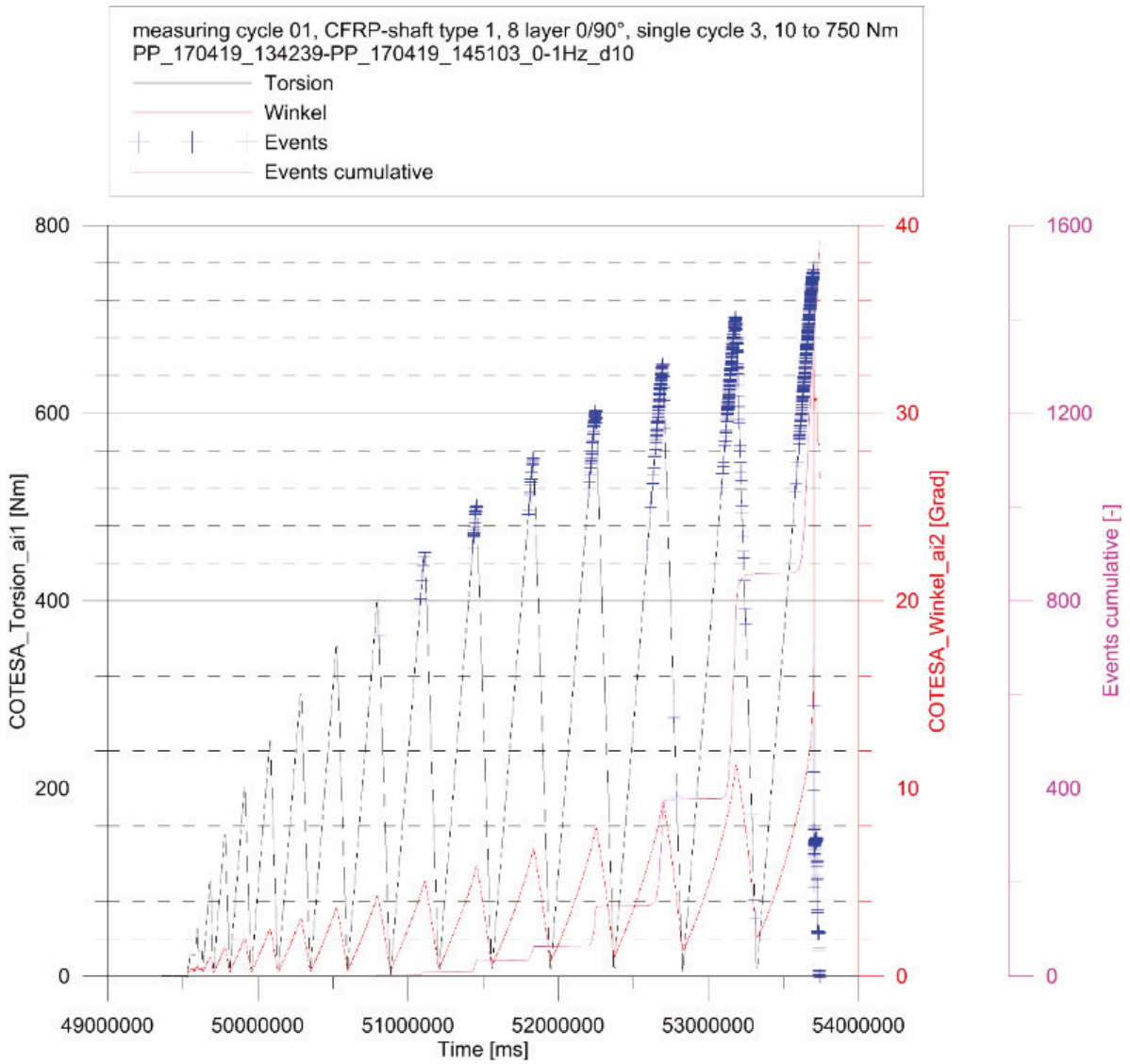


Abbildung 5.4-1 Geortete Schallemissionsereignisse (Events) im Drehmoment-/ Drehwinkelverlauf mit kumulativer Event-Anzahl für ein 0°/90° CFK-Rohr

Es ist ein Anstieg der kumulierten Anzahl der Events nach jedem belastenden Zyklus zu erkennen. Dieses aus anderen Versuchsreihen bekannte und erwartete Verhalten zeigt ebenso, dass die Anzahl der Events bezogen auf den Einzelbelastungszyklus bei höheren Momenten steigen. Auch bei dieser Messkampagne ist zu erkennen, dass es keine signifikante Schallemission unterhalb des zuvor erreichten Lastmoments gibt und sich deshalb die Bildung des Felicity-Ratios nicht als Schadensindikator eignet. Ersetzt man die kumulierten Events in dieser Darstellung durch die kumulative Energie georteter Schallemissionsereignisse, so erhält man nachfolgende Abbildung 5.4-2.

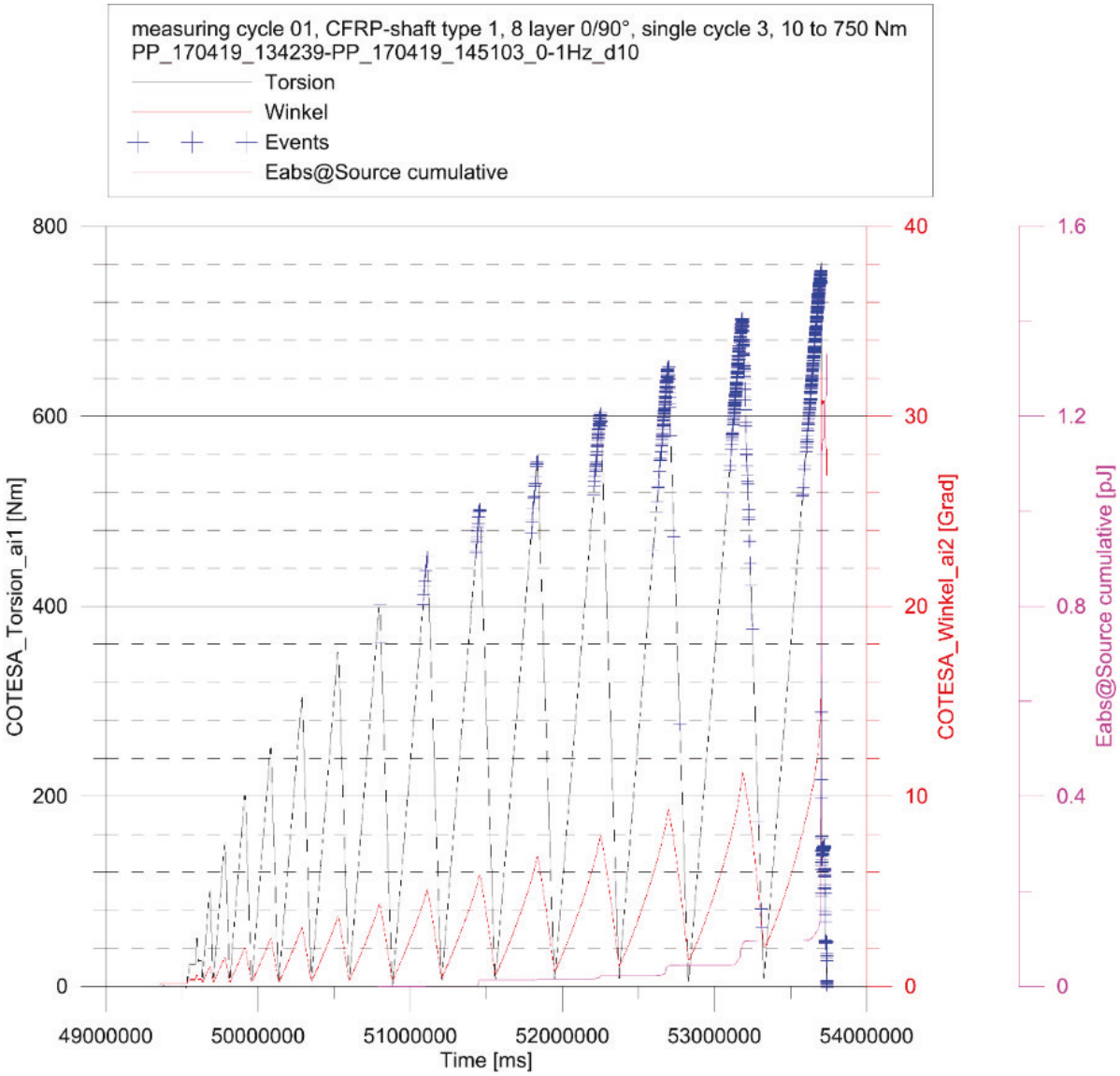


Abbildung 5.4-2 Kumulative Energie georteter Schallemissionsereignisse in Pikojoule ($10^{-12}J$) im Drehmoment-Drehwinkelverlauf für ein 0°/90° CFK-Rohr

Ein starker Anstieg der kumulierten Energie der Schallemissionssignale kann erst kurz vor Versuchsende verzeichnet werden. Das Versuchsende bedeutet das Versagen der CFK-Rohre. Es handelt sich hier sehr wahrscheinlich hauptsächlich um die aufsummierte Energie beim Kollabieren des Rohres. In diesen Darstellungen ist es somit nicht möglich, über die abgebildeten Schallemissionsparameter Aussagen bezüglich der Betriebsfestigkeit und über den zu erwartenden Schädigungszeitpunkt zu treffen.

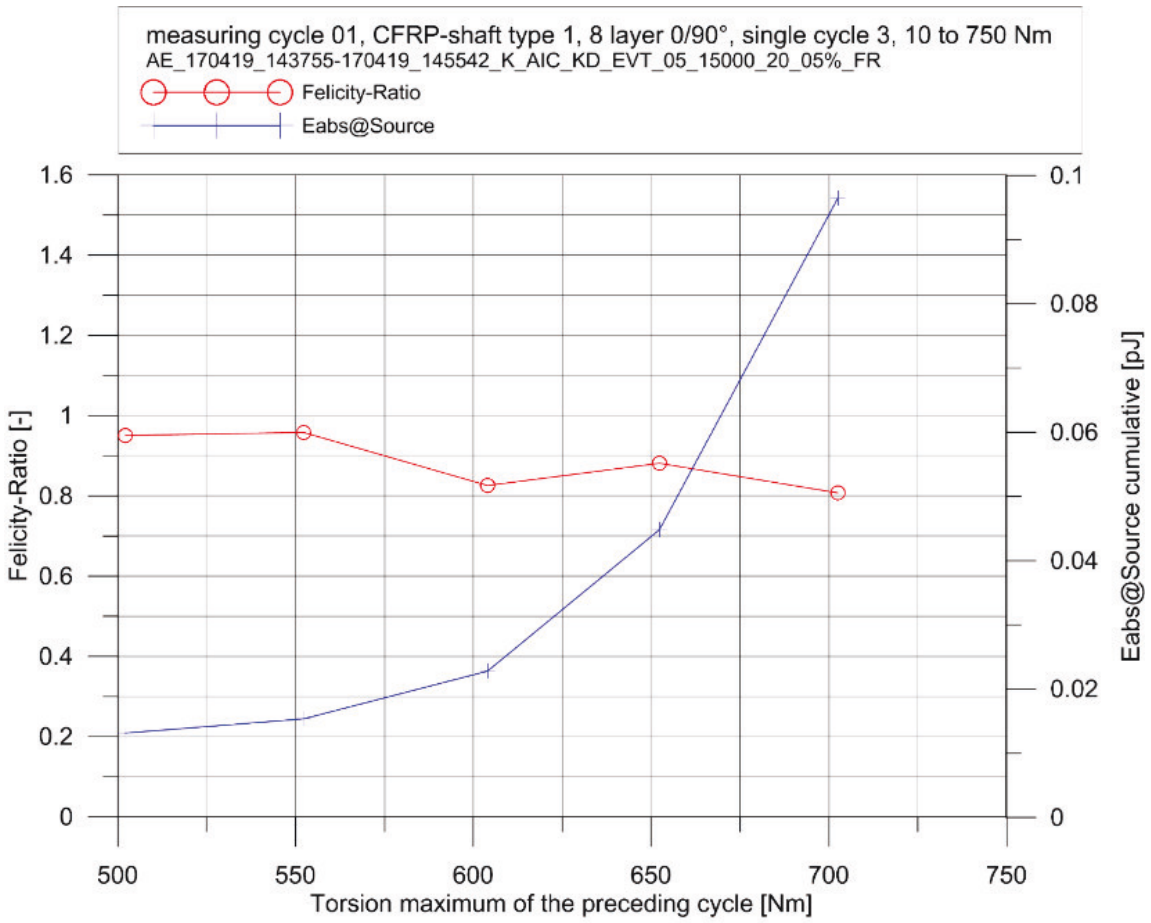
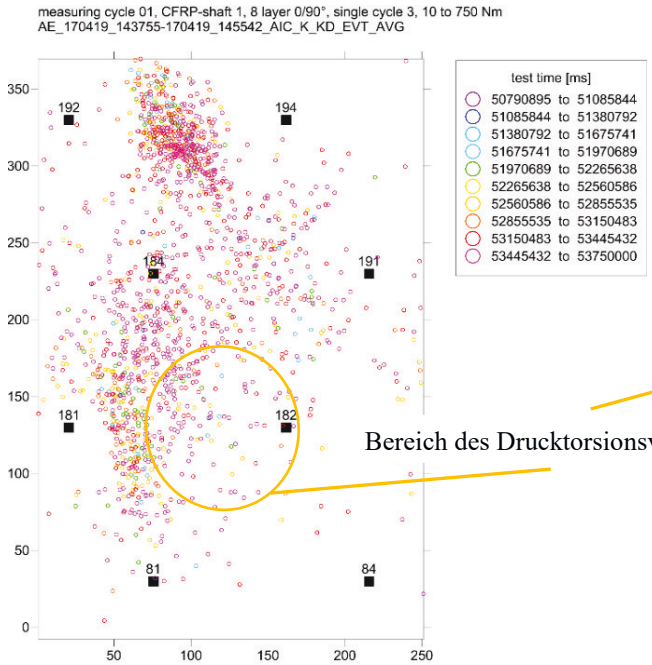


Abbildung 5.4-3 Felicity-Ratio und/ oder kumulative Burstenergie als potentieller Schadensindikator für ein 0°/90° CFK-Rohr

Wenn man die kumulierte Energie hingegen als Graphen über den beaufschlagten Momenten abbildet (siehe Abbildung 5.4-3), ist ein signifikanter Anstieg der Energie ca. 100 Nm bis 150 Nm vor Versagen der Probe zu erkennen. Ein sprunghafter Anstieg der Schallemissionsrate und/ oder Energiekurve kann somit dennoch als frühzeitiger Schadensindikator genutzt werden. Das Felicity-Ratio ist aufgrund einer sehr geringen, durch Reiben induzierten Schallemission als zu unsensibel für einen Schadensindikator bei dieser Versuchskonfiguration an CFK-Rohren einzustufen.

Das 2D-Ortungsplot der Schallemissionen über eine gesamte Versuchszeit bei einem 0°/90° CFK-Rohr, das im Vergleich zu Rohren mit einem +45°/-45 Lagenaufbau ein verhältnismäßig niedriges Bruchtorsionsmoment aufweist, zeigt erhöhte Schallemissionsaktivitäten (Abbildung 5.4-4). Jedoch ist im Versagensbereich, wo die druckbelasteten Fasern ausknicken, keine Vorschädigung in der Schallemissionsverteilung zu erkennen (Abbildung 5.4-5). Die Bereiche der mit der Schallemissionsanalyse ermittelten Vorschädigungen stimmen oftmals nicht mit denen der späteren Druckbrüche überein. Sie sind damit nur Ausgangszonen des finalen Versagens oder erweitern sich lokal mit steigender Torsion. Die Ursache hierzu kann der mehrachsig komplexe Torsionsspannungszustand in einem solchen Prüfling sein.



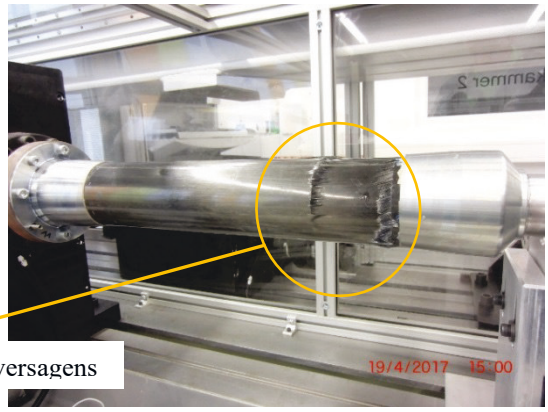


Abbildung 5.4-4 Ergebnis der planaren Ortung auf der 2D-Oberfläche eines 0°/90° CFK-Rohrs mit einer Farbkennzeichnung nach der Testzeit

Abbildung 5.4-5 0°/90° CFK-Rohr nach Versagen im Bereich der Gegenhalterung rechts

Die magenta eingefärbten Schallemissionsereignisse, die kurz vor Versagen detektiert wurden und einen großen Anteil der Gesamtschallemissionen aufweisen, stützen die These, dass kurz vor dem Kollabieren der Prüflinge gehäuft Schallemissionen auftreten, diese jedoch für eine Felicity-Ratio-Bildung nicht geeignet sind, da sie ebenfalls hauptsächlich nach dem Überfahren des vorangegangenen Belastungsmomentes auftreten. Aus den Abbildung 5.4-6 bis Abbildung 5.4-9, bei denen die Schallemissionsparameter Amplitude, gewichtete Vorzugsfrequenz, Schallemissionszuordnung zu Moment und deren Häufung in einem 5x5x5 mm³ Voxeln in dreidimensionalen Darstellungen abgebildet sind, lassen sich ebenfalls keine neuen Schlüsse bezüglich eines „warnenden“ Schädigungsindikators schließen. Gemäß Literatur [26] sind unterschiedliche Amplitudenverteilungen ein Hinweis auf die Anzahl der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen. Die Frequenzanalyse lässt, wie in Kapitel 4.9 gezeigt wurde, Rückschlüsse auf den Schädigungsmechanismus zu. Grundlage hierfür ist die Annahme, dass eine höhere Verteilung der Amplitude in ihrer Intensität eine höhere Anzahl an unterschiedlichen Schädigungsmechanismen beinhaltet. Es wird angenommen, dass eine höhere Amplitude einen schwerwiegenderen Schaden darstellt.

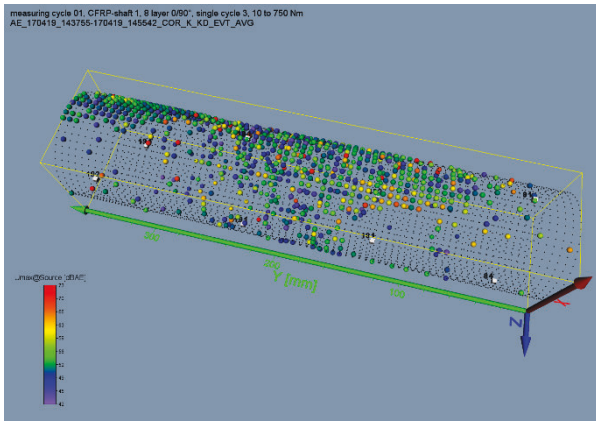


Abbildung 5.4-6 3-D-Ortungsplot eines 0°/90° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Maximalamplitude des Burstsignals in dB_{AE}

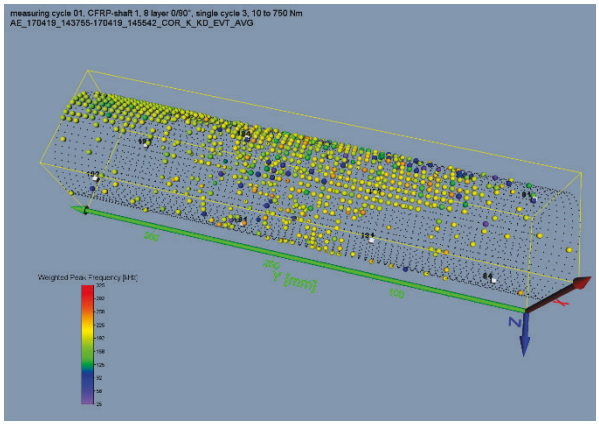


Abbildung 5.4-7 3-D-Ortungsplot eines 0°/90° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der gewichteten Vorzugsfrequenz der Burstsignale in kHz

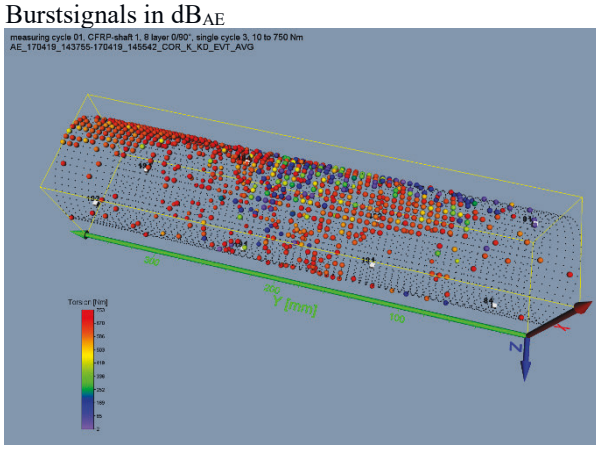


Abbildung 5.4-8 3-D-Ortungsplot eines 0°/90° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Torsion beim Auftreten der akustischen Emission in Nm

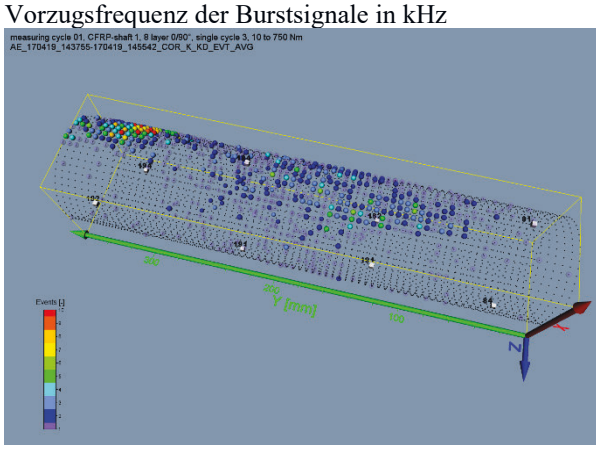


Abbildung 5.4-9 3-D-Ortungsplot eines 0°/90° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Anzahl von Events in den 5x5x5 mm³ Voxeln

Bei den Ergebnissen der Schallemissionsanalyse im Zusammenhang mit den Torsionswechseltests an 0°/90° CFK-Rohren fällt auf, dass die Maximalamplituden über einen relativ kleinen Bereich verteilt sind. Dies ist ein Indiz dafür, dass es wenig unterschiedliche Schädigungsmechanismen gibt. Die statistische Auswertung der gewichteten Vorzugsfrequenz stützt die Aussage. Anders als bei den Fatique-Tests mit Zug-und Druckbelastung, bildet sich die gewichtete Vorzugsfrequenz zu großen Teilen im Bereich um 200 kHz aus. Dieser Bereich steht für ein kombiniertes Schädigungsbild aus Faser- und Matrixversagen (z.B. Debonding). Die gewichtete Vorzugsfrequenz in diesem Frequenzbereich ist über den gesamten Versuchszeitraum einer Versuchsreihe führend und daher kann über die Vorzugsfrequenz bei dieser Versuchskonfiguration ebenfalls keine Aussage über den Schädigungsverlauf und die Restfestigkeit getroffen werden. Bei einem anderen CFK-Rohr mit einem 0°/90° Lagenaufbau versagte das Rohr zwar auf der gegenüberliegenden Einspannseite, allerdings war bei diesen Ergebnissen hinsichtlich der Schallemissionsanalyse die Vergleichbarkeit zu den hier dargestellten Ergebnissen gegeben und die Schallemissionsmessung war folglich nicht fehlerbehaftet.

Die Ergebnisse einer Versuchsreihe eines CFK-Rohrs mit einem +45°/-45° Lagenaufbau, zeigen von der Schallemissionsaktivität, verglichen mit den 0°/90° Rohren, weniger Schallemissionen. Auch hier waren die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse unter den +45°/-45° CFK-Rohren reproduzierbar.

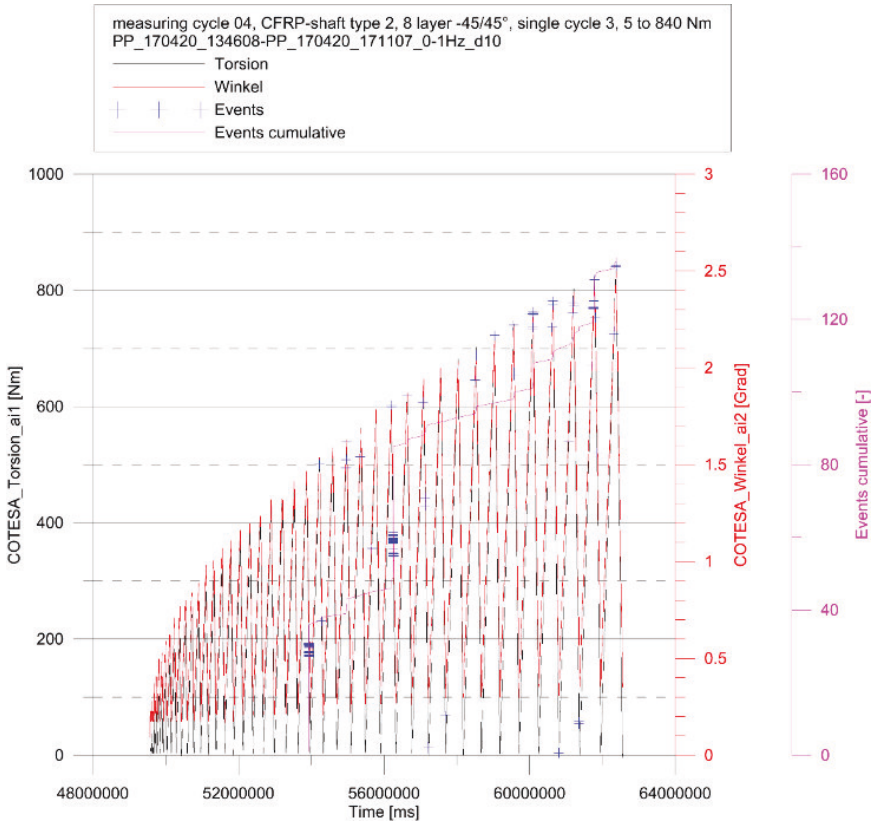


Abbildung 5.4-10 Geortete Schallemissionsereignisse (Events) im Drehmoment-/ Drehwinkelverlauf mit kumulativer Event-Anzahl für ein +45°/-45° CFK-Rohr

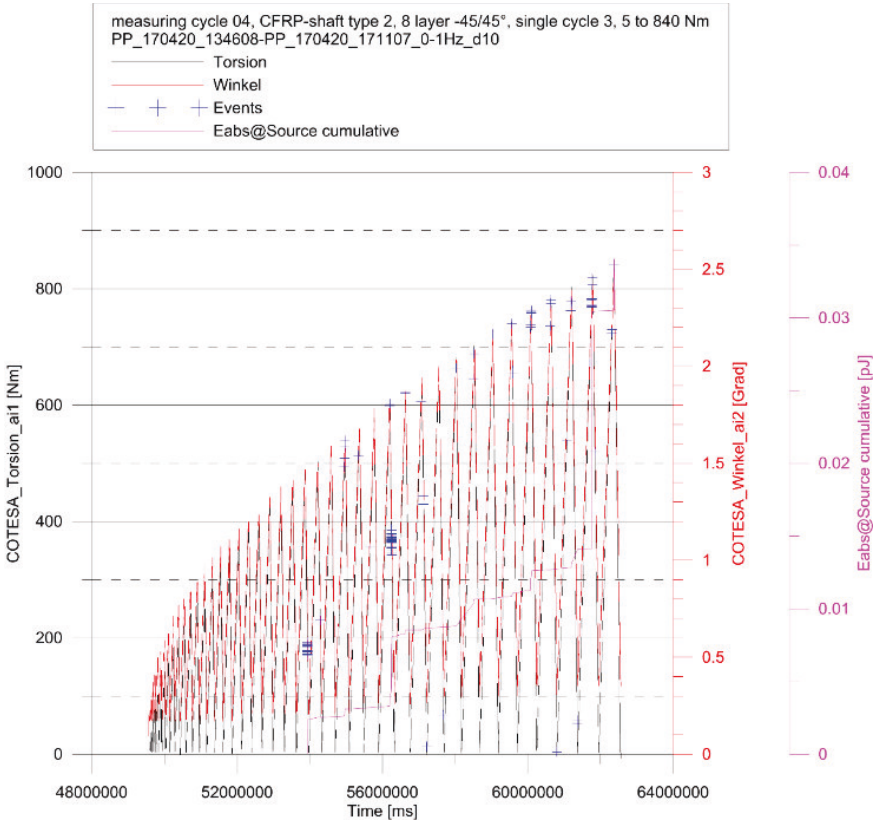


Abbildung 5.4-11 Kumulative Energie georteter Schallemissionsereignisse in Pikojoule *($10^{-12}J$)* im Drehmoment-/ Drehwinkelverlauf für ein +45°/-45° CFK-Rohr

Analog zur Ergebnisdarstellung der CFK-Rohre mit einem 0°/90° Lagenaufbau sind die einzelnen, georteten Schallemissionsereignisse, der kumulierten Anzahl der Events, dem Winkel und den Torsionszyklen eines CFK-Rohres mit +45°/-45°Lagenaufbau in Abbildung 5.4-10 dargestellt. Es ist ein erwarteter Anstieg der kumulierten Anzahl der Events nach jedem belastenden Zyklus zu erkennen. Gleichwohl ist bei der Messreihe keine signifikante Schallemission unterhalb des zuvor erreichten Lastniveaus erfasst worden. Somit ist auch hier das Felicitiy-Ratio nicht als Schadensindikator geeignet (Abbildung 5.4-12). Ein vergleichbares Verhalten sieht man bei der kumulierten Energie als Schallemissionsparameter der Schallemissionssignale (Abbildung 5.4-11). Bei den CFK-Rohren mit +45°/-45° Lagenaufbau kommt es in den letzten zwei Belastungszyklen vor Versagen zu einem signifikanten Anstieg der Energie. Da dies kurz vor Versagen stattfindet, ist es kaum möglich, bei der Darstellung dieses Schallemissionsparameters in den zyklischen Belastungsrampen eine zuverlässige Aussage bezüglich des zu erwartenden Schädigungszeitpunktes und Schädigungsgrades zu treffen. Im Allgemeinen ist die Schallemissionsaktivität geringer als bei Rohren mit einem 0°/90° Lagenaufbau und das Bruchtorsionsmoment des CFK-Rohres mit einem +45°/-45° Lagenaufbau korrespondiert indirekt mit der Schallemissionsrate. Sie zeigen bei einem hohen Bruchtorsionsmoment bis kurz vor dem Druckbruch nur geringe Schallemissionsaktivitäten.

Auch bei einem Lagenaufbau von +45°/-45° kann ein signifikanter Anstieg der Schallemissionsrate und/ oder Energiekurve, wenn sie über das beaufschlagte Moment aufgetragen wird, auf ein baldiges Versagen des CFK-Rohres hinweisen. In Abbildung 5.4-12 ist dieses Verhalten kurz nach einer Belastung von 900 Nm erkennbar. Das Felicity-Ratio ist aufgrund von einer sehr geringen, durch Reiben induzierten Schallemission, als zu unsensibel für einen Schadensindikator bei dieser Versuchskonfiguration an CFK-Rohren einzustufen.

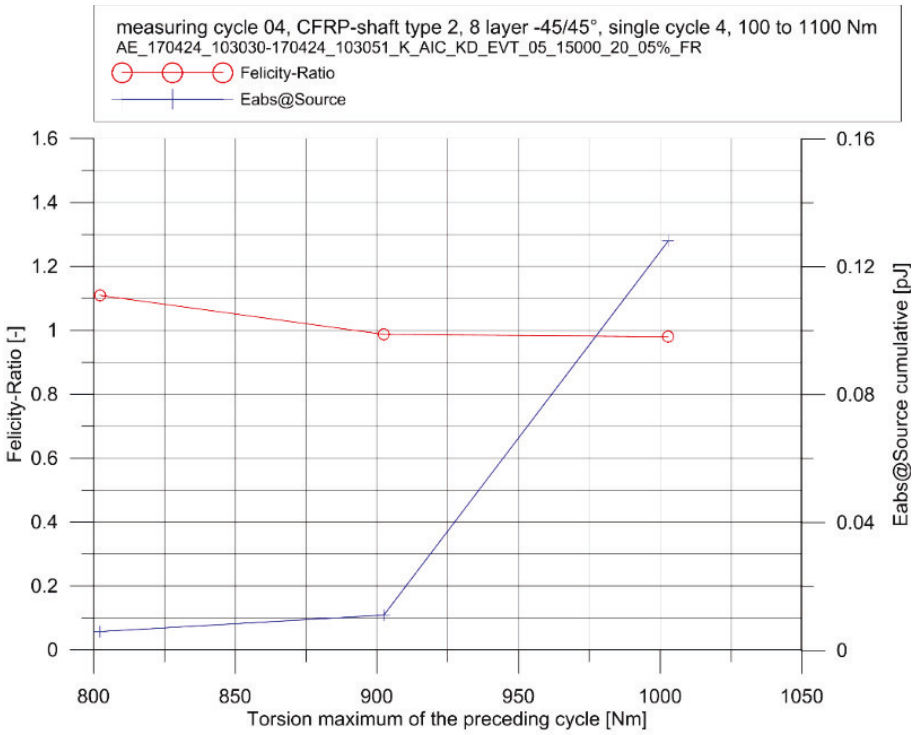


Abbildung 5.4-12 Felicity-Ratio und/ oder kumulative Burstenergie als potentieller Schadensindikator für ein +45°/-45° CFK-Rohr

Aus den Abbildungen Abbildung 5.4-13 bis Abbildung 5.4-16, bei denen gleichermaßen die Schallemissionsparameter Amplitude, gewichtete Vorzugsfrequenz, Schallemissionszuordnung zu Moment und deren Häufung in einem 5x5x5 mm³ Voxeln in dreidimensionalen Darstellungen analog zur Ergebnisdarstellung der Rohre mit einem 0°/90° Lagenaufbau abgebildet sind, lassen sich auch keine neuen Schlüsse bezüglich eines „warnenden“ Schädigungsindikators schließen.

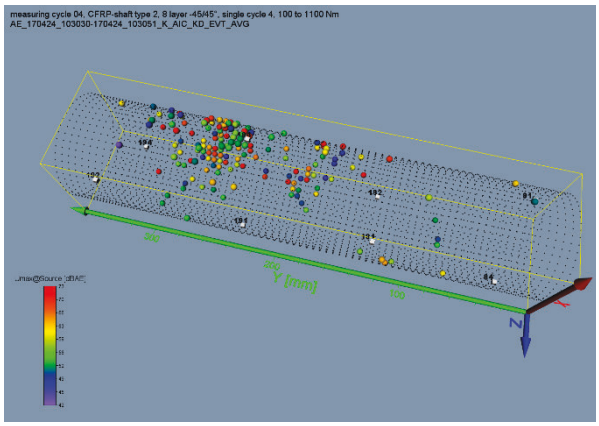


Abbildung 5.4-13 3-D-Ortungsplot eines +45°/-45° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Maximalamplitude des Burstsignals in dB_{AE}

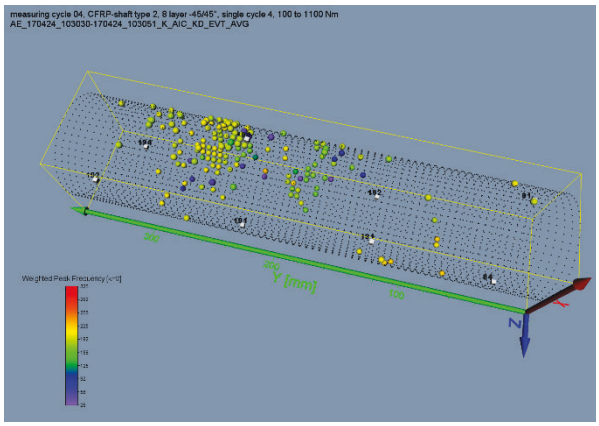


Abbildung 5.4-14 3-D-Ortungsplot eines +45°/-45° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der gewichteten Vorzugsfrequenz der Burstsignale in kHz

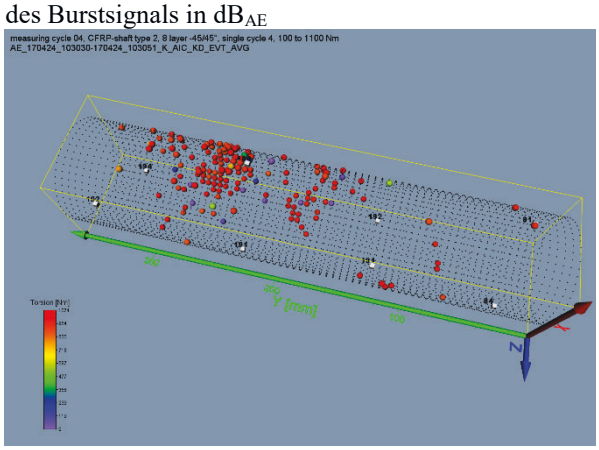


Abbildung 5.4-15 3-D-Ortungsplot eines +45°/-45° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Torsion beim Auftreten der akustischen Emission in Nm

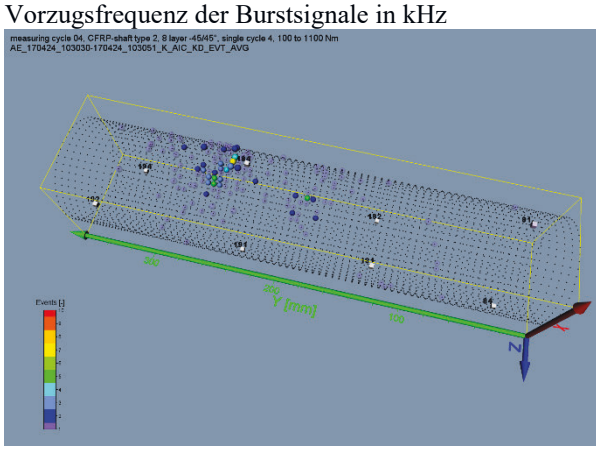


Abbildung 5.4-16 3-D-Ortungsplot eines +45°/-45° CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Anzahl von Events in den 5x5x5 mm³ Voxeln

Die Maximalamplitude der Schallemissionsereignisse befindet sich bei dieser Versuchsreihe im selben Bereich wie bei den Rohren mit 0°/90° Lagenaufbau, was ebenfalls auf wenig unterschiedliche Schädigungsmechanismen hinweist. Zum selben Ergebnis kommt man, wenn man zusätzlich den Schallemissionsparameter gewichtete Vorzugsfrequenz auswertet, die sich hauptsächlich in einem Bereich von 180 kHz bis 220 kHz befindet und auf eine ähnliche Schädigungsart (Debonding) wie bei den 0°/90° Rohren schließen lässt. Schallemissionen mit hohen Amplituden traten bei diesem Versuch erst gegen Ende des Versuches auf und bei niedrigen Momenten traten kaum Schallemissionen auf. Im Schädigungsbereich sind bei dieser Versuchsreihe gehäuft Schallemissionen zu erkennen (Vergleich der georteten Schallemissionen in Abbildung 5.4-16 mit geschädigtem Bereich am CFK-Rohr in Abbildung 5.4-17).

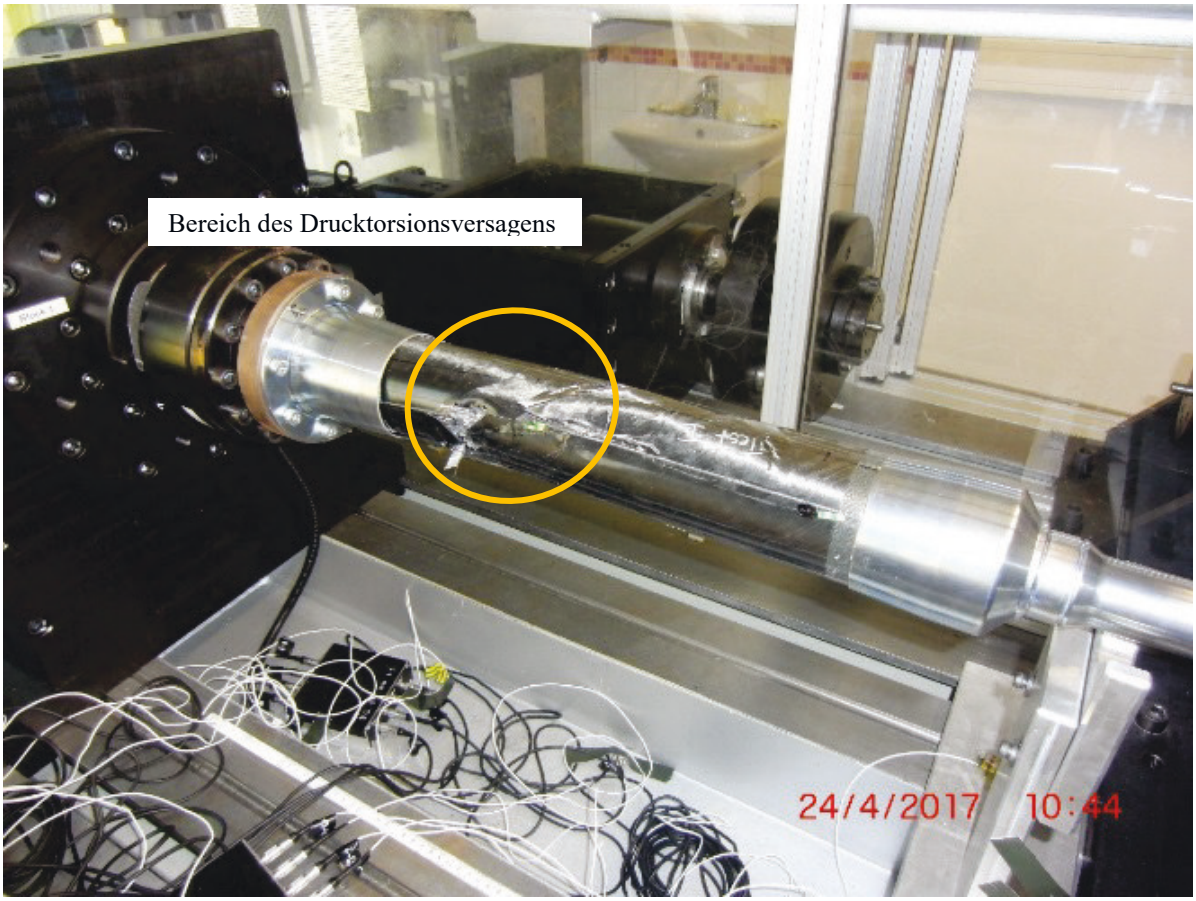


Abbildung 5.4-17 CFK-Rohr mit +45°/-45° Lagenaufbau nach Versagen mit deutlich erkennbarem Druckbruch links

Für die quasiisotrop laminierten CFK-Rohre wird nach der Auswertung der anderen zwei CFK-Rohre hinsichtlich den Schallemissionsaktivitäten ein kombiniertes Verhalten aus den Schallemissionen der CFK-Rohre mit 0°/90°-Lagenaufbau und +45°/-45° Lagenaufbau erwartet. Je nach Schädigungshistorie können erhöhte Reibgeräusche erwartet werden, die durch Schäden im Niedermomentbereich induziert werden können. Dieses Phänomen kann der im allgemeinen niedrigeren Einzelfaserlagen mit gleicher Faserorientierung zugeschrieben werden, die sich früher vorschädigen.

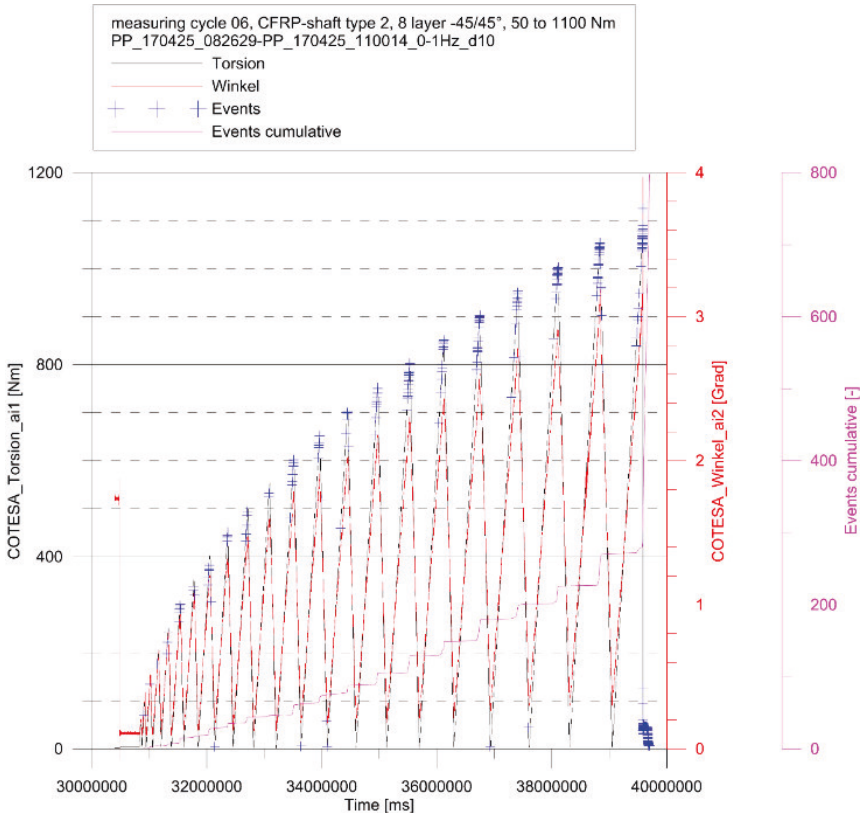


Abbildung 5.4-18 Geortete Schallemissionsereignisse (Events) im Drehmoment-/ Drehwinkelverlauf mit kumulativer Event-Anzahl für ein CFK-Rohr mit quasiisotropem Lagenaufbau

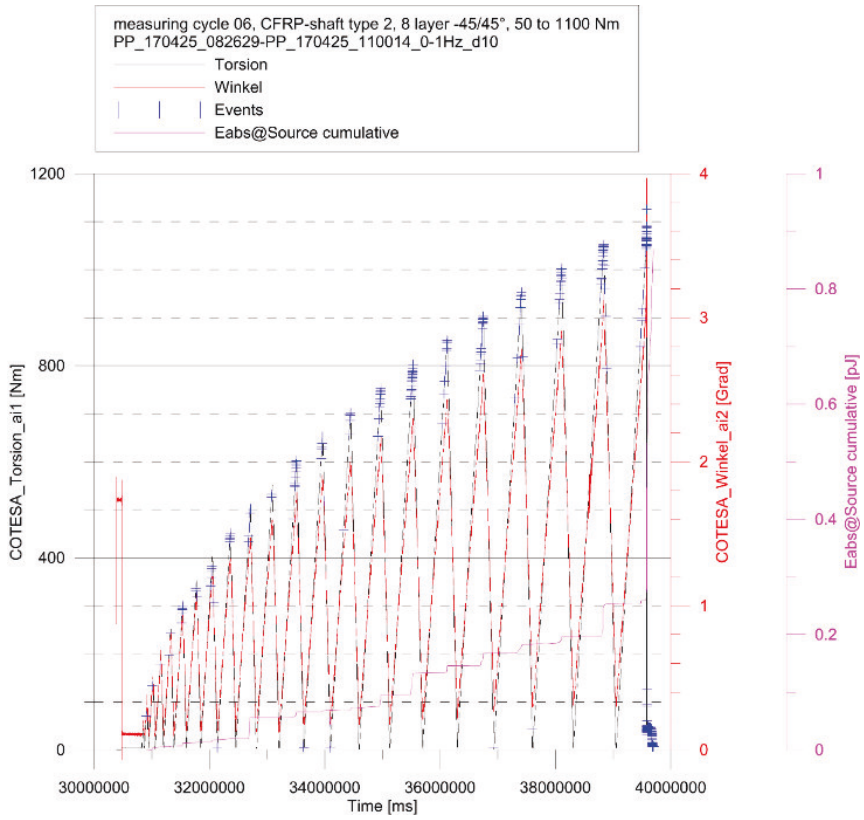


Abbildung 5.4-19 Kumulative Energie georteter Schallemissionsereignisse in Pikojoule *($10^{-12}J$)* im Drehmoment-/ Drehwinkelverlauf für ein CFK-Rohr mit quasiisotropem Lagenaufbau

Das Schallemissionsverhalten ist bei den Rohren mit einem quasiisotropen Lagenaufbau mit dem der CFK-Rohre, die mit den anderen zwei Lagenaufbauten gefertigt wurden, prinzipiell vergleichbar. In Abbildung 5.4-18 sind die einzelnen georteten Schallemissionsereignisse, der kumulierten Anzahl der Events, dem Winkel und den Torsionszyklen für ein quasiisotrop aufgebautes CFK-Rohr dargestellt. Der in diesem Fall „treppenartige“ Anstieg der kumulierten Anzahl der Events nach den jeweiligen Belastungszyklen in Kombination mit annähernd keiner signifikanten Schallemissionsaktivität unterhalb des zuvor erreichten Belastungsniveaus, spiegelt die Ergebnisse der Schallemissionsauswertung der zuvor diskutierten Ergebnisse der CFK-Rohre mit dem 0°/90°-Lagenaufbau und dem 45°/-45°-Lagenaufbau wider. Auch hier ist das Felicity-Ratio, wie in Abbildung 5.4-20 dargestellt, nicht als Schadensindikator geeignet und der stärkste Anstieg der kumulierten Anzahl der Events wird kurz vor dem Versagen des CFK-Rohrs verzeichnet. Auch die Darstellung der kumulierten Energie als Schallemissionsparameter in Abbildung 5.4-19 liefert dasselbe Ergebnis, welches einen schlagartigen Anstieg der kumulierten Energie beim letzten Belastungszyklus vor Kollabieren des Prüflings zeigt. Dies lässt keine Rückschlüsse auf den zu erwartenden Schädigungszeitpunkt und den Schädigungsgrad zu. Die Schallemissionsaktivität liegt bei den quasiisotropen CFK-Rohren annähernd auf dem Niveau der 0°/90° Prüflinge. Erwartungsgemäß sind dabei viele Emissionen bei niedrigen Torsionslasten nach Druckbruch und den dadurch entstehenden Reibgeräuschen bei weiteren zyklischen Belastungen zu verzeichnen. Die erfassten Schallemissionen am Ende des Versuches bei einem niedrigen Torsionsmoment sind Reibgeräuschen nach dem Versagen des Prüflings zuzuordnen. Diese sind gesondert zu betrachten und dürfen in die Auswertung der kumulierten Energien und der kumulierten Anzahl der Events im Hinblick auf die Bildung des Graphen, der sich als Schadensindikator eignet, nicht mit einbezogen werden

Als Schadensindikator für die CFK-Rohre mit quasiisotropem Lagenaufbau kann wie bei den Rohren mit den zwei anderen Lagenaufbauten der sprunghafte Anstieg der Schallemissionsrate und/ oder Energiekurve, wenn sie über das beaufschlagte Moment aufgetragen wird, herangezogen werden (siehe Abbildung 5.4-20).

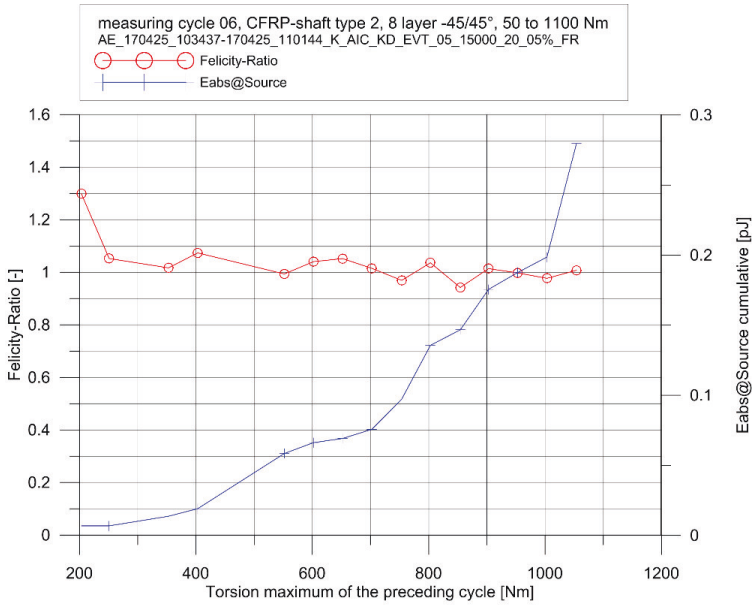


Abbildung 5.4-20 Felicity-Ratio und/ oder kumulative Burstenergie als potentieller Schadensindikator für ein CFK-Rohr mit quasiisotropem Lagenaufbau

Wie bei der vorangegangenen Ergebnisdiskussion sind von Abbildung 5.4-21 bis Abbildung 5.4-24 die Schallemissionsparameter Amplitude, gewichtete Vorzugsfrequenz, Schallemissionszuordnung zu Moment und deren Häufung in einem 5x5x5 mm³ Voxeln in dreidimensionalen Darstellungen abgebildet.

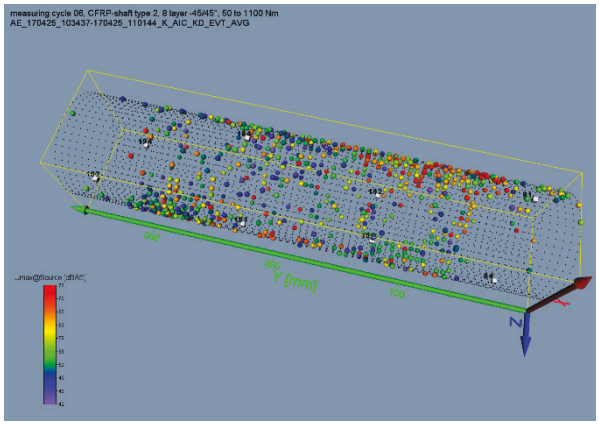


Abbildung 5.4-21 3-D-Ortungsplot eines quasiisotropen CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Maximalamplitude des Burstsignals in dB_{AE}

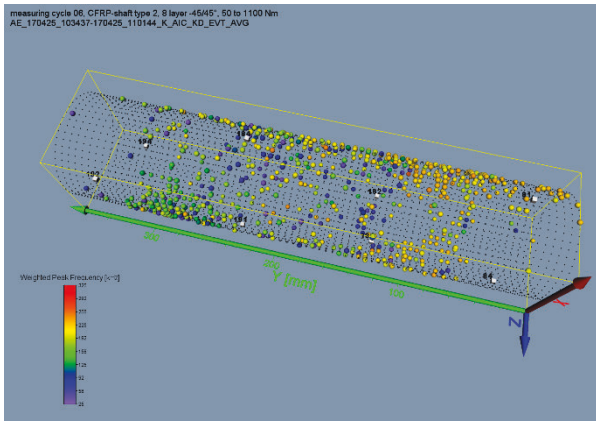


Abbildung 5.4-22 3-D-Ortungsplot eines quasiisotropen CFK-Rohrs mit Farbkodierung der gewichteten Vorzugsfrequenz der Burstsignale in kHz

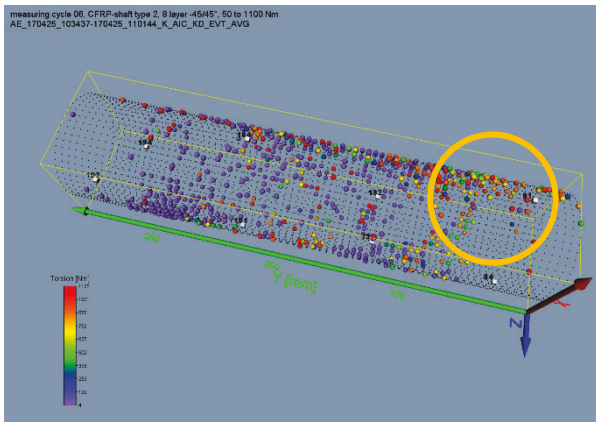


Abbildung 5.4-23 3-D-Ortungsplot eines quasiisotropen CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Torsion beim Auftreten der akustischen Emission in Nm

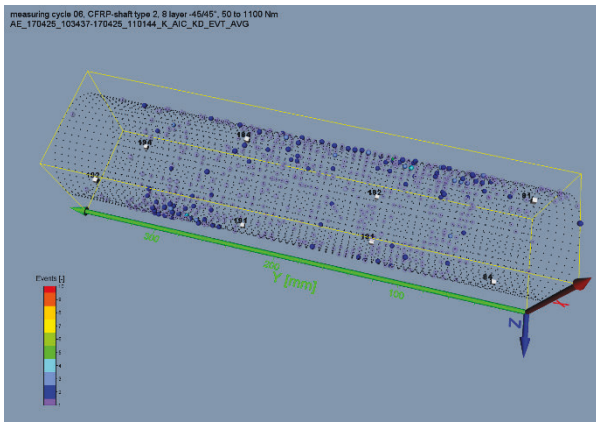


Abbildung 5.4-24 3-D-Ortungsplot eines quasiisotropen CFK-Rohrs mit Farbkodierung der Anzahl von Events in den 5x5x5 mm³ Voxeln

Das maximale Amplitudenband ist vergleichbar mit den zuvor diskutierten Ergebnissen der CFK-Rohre mit den zwei unterschiedlichen Lagenaufbauten. Jedoch ist die Verteilung im gesamten Bereich gleichmäßiger. Dies lässt auf eine größere Anzahl von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen schließen. Ähnlich verhält es sich bei der Darstellung der gewichteten Vorzugsfrequenz. Zwar ist der größte Anteil der Events auch hier im Bereich von 180 kHz bis 220 kHz, allerdings sind nicht unerhebliche Mengen an Events sowohl darüber als auch darunter zu verzeichnen. Für ein statistisches Messverfahren wie die Schallemissionsanalyse sind einzelne Schallereignisse bei der Auswertung und Interpretation nicht relevant. Somit sind die höheren Schallemissionsaktivitäten bei niedrigen Torsionsmomenten plausibel und sie stehen für mindestens eine weitere Schädigungsart. Die Darstellung der Schallemissionsereignisse über den Momentenbereich des Versuches zeigt ebenfalls, dass die Emissionen über den gesamten Prüfzeitraum fast gleichmäßig verteilt sind. Dieses quasiisotrope CFK-Rohr versagte im Zentrum (Abbildung 5.4-25). Die georteten Schallemissionen können den Ausgang des „Hauptschadens“ im hinteren rechten Bereich ausweisen. Es sind gehäuft Schallemissionen in eben diesem Bereich erkennbar. Dieser Bereich

ist in Abbildung 5.4-23 mit einem orangenen Kreis markiert. Allerdings bieten die diskutierten Schallemissionsparameter auch bei den CFK-Rohren mit einem quasiisotropen Lagenaufbau nicht die Möglichkeit, als Schädigungsindikator vor dem Versagen zu „warnen“.

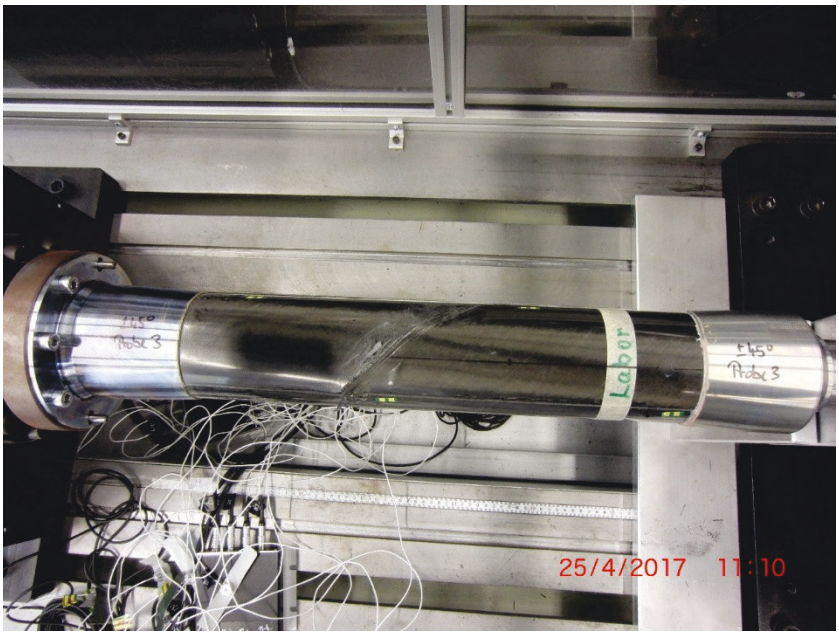


Abbildung 5.4-25 Quasiisotrop aufgebautes CFK-Rohr nach zentrumsnahem Druckbruch

Abschließend sind im Folgenden die Darstellungen der Schallemissionsereignisse der zyklischen Belastungstests der CFK-Rohre von allen drei verschiedenen Lagenaufbauten in der gewohnten WPF-PP-Darstellung abgebildet. Zur besseren Clusterabgrenzung, gerade im Hinblick auf die Verdeutlichung des mittleren Clusters (Faser-Matrix-dominierte Schädigungsereignisse), werden die gewichteten Vorzugsfrequenzen hier über der partiellen Leistung 2 abgetragen, da diese den Bereich des Faser-Matrix-dominierten Schadens besonders hervorhebt. Wie in Abbildung 5.4-26 bis Abbildung 5.4-28 zu erkennen ist, bilden sich analog zu den Untersuchungen an den Couponproben drei verschiedene Schädigungscluster aus. Das Cluster der Faser-Matrix-dominierenden Schädigungsmechanismen (z.B. Debonding) bildet sich am deutlichsten aus. Dazu kommt, dass dieses Cluster bei allen drei Lagenaufbauten der CFK-Rohre im selben Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz und der partiellen Leistung (150 kHz bis 200kHz, partielle Leistung 2 von ca. 60% bis 100%) zu finden ist. Neben der dominanten Faser-Matrix-Wechselwirkung zeichnen sich einige wenige Faserrisse und Reibvorgänge ab. Das erste Cluster und das letzte Cluster bilden sich sehr wahrscheinlich anhand von Schallemissionen, die nach dem Versagen, oder zumindest nach einer erheblichen Vorschädigung, entstanden sind. Somit ist das mittlere Cluster das dominierende Schädigungscluster bei den Untersuchungen an CFK-Rohren mit den unterschiedlichen Lagenaufbauten und die Abbildungen unterstützen die zuvor aufgestellte These.

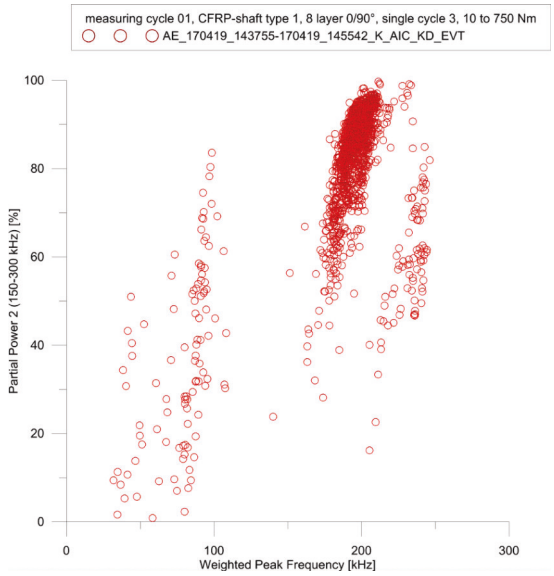


Abbildung 5.4-26 WPF-PP-Plot der Schallemissionsereignisse eines 0°/90° CFK-Rohres

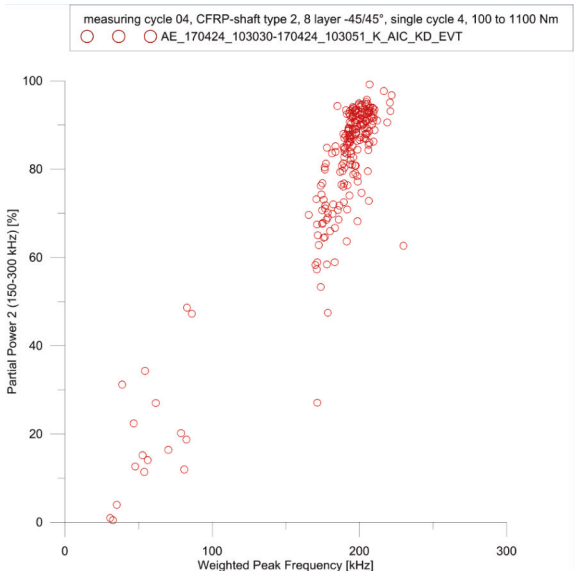


Abbildung 5.4-27 WPF-PP-Plot der Schallemissionsereignisse eines +45°/-45° CFK-Rohres

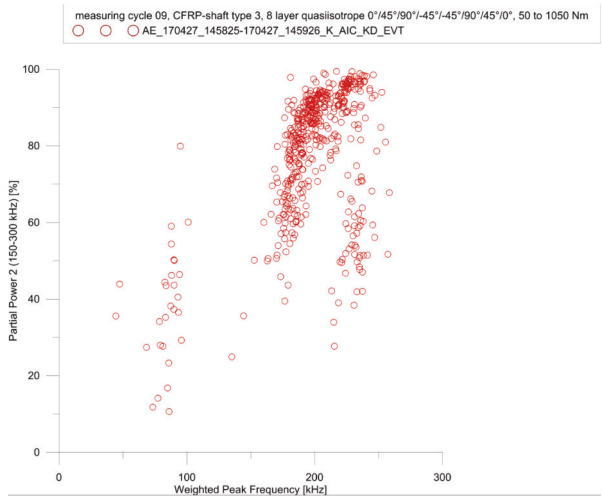


Abbildung 5.4-28 WPF-PP-Plot der Schallemissionsereignisse eines quasiisotropen CFK-Rohres

Die Ergebnisse der Untersuchungsreihe an CFK-Rohren sind vergleichbar und haben dieselbe Kernaussage. Es variiert lediglich die Anzahl der Schallemissionssignale je Lagenaufbau, was durch die WPF-PP-Darstellungen zusätzlich deutlich gemacht wird.

Abschließend können folgende Ergebnisse der Schallemissionsanalyse als prüfstandsbegleitendes Bewertungsverfahren bei torsionsbelasteten CFK-Rohren zusammengefasst werden.

- CFK-Wellen mit ±45°- Lagenaufbau weisen ein sehr hohes Bruchtorsionsmoment auf (Schubspannungszustand).
- Aufgrund der dominanten Versagensmechanismen bei Torsionsbelastung der druckbelasteten Lage bei einer Spannung in Faserrichtung (Schubspannungszustand bei +-45° Lagenaufbau), ist das Faser-Matrix-Ablösen (Debonding) als Quellmechanismus der Vorschädigung identifizierbar.
- Beim typischen Versagensverlauf korrespondiert die laterale Lage einzelner Schäden mit dem längenbezogenen Drillwinkel. Dabei nimmt die Verdrillung vom Antrieb zur

Gegenhalterung ab. Lediglich bei hohen Torsionskräften sind lokale Schäden an der Gegenhalterung zu erwarten, die bis zum Versagen führen können.

- Bruch der druckbelasteten Lage bei einer Spannung in Faserrichtung.
- Zugspannung senkrecht zur Faser der druckbelasteten Lage begünstigt das Ausknicken.
- Das Bruchtorsionsmoment der Welle korrespondiert indirekt mit der Schallemissionsrate. CFK-Wellen mit ±45° Lagenaufbau und einem hohen Bruchtorsionsmoment zeigen bis kurz vor dem Druckbruch nur geringe Schallemissionsaktivitäten.
- Wellen mit 0/90° Lagenaufbau und niedrigem Bruchtorsionsmoment zeigen erhöhte Schallemissionsaktivitäten. Im Versagensbereich der Welle, Ausknicken der druckbelasteten Fasern, ist jedoch keine Vorschädigung im „Schallemissionsbild“ erkennbar
- Ein sprunghafter Anstieg der Schallemissionsrate und / oder der Energiekurve kann dennoch als frühzeitiger Schadensindikator genutzt werden.
- Der Druckbruch bei Torsionsbelastung kündigt sich zwar im sprunghaften Anstieg der Schallemissionsrate und/ oder der Energiekurve an, allerdings ist die Lage des Versagens aufgrund der komplizierten Spannungsverteilung im CFK-Rohr nicht direkt aus den Ortungsplots ableitbar, wohingegen bei zyklischen Fatique-Tests mit Zug-/ Druckbelastung die Möglichkeit besteht.
- Das Felicity-Ratio ist aufgrund des geringen Anteils an reibungsinduzierter Schallemission zu unsensibel um als Schadensindikator herangezogen zu werden (zu geringe Anzahl an niederfrequenten, durch Reibungsvorgänge initiierte Bursts vorhanden).
- Die Orte der mit der Schallemissionsanalyse ermittelten Vorschädigungen stimmen oftmals nicht mit denen der späteren Druckbrüche überein. Sie sind oftmals nur Ausgangszonen des finalen Versagens oder erweitern sich lokal mit steigender Torsion.
- Die Statistik der gewichteten Vorzugsfrequenz zeigt, anders als bei Fatique-Tests mit Zug- Druckbelastung, eine eingipfelige Verteilung mit dem Maximum bei 200 kHz, die das Debonding als Hauptschädigungsmechanismus bestätigt.

5.4.2 Ergebnisse Räderprüfung

Zur Erfassung von Schädigungsverläufen von CFK-Rädern wurden mehrere Versuchsreihen und Messkampagnen mit quasi-statischen Belastungstests auf einer Universalprüfmaschine durchgeführt und mit der Schallemissionsmessung begleitet. Die Versuche werden zyklisch, laststeigernd und lastabfallend bis zum Versagen der Bauteile durchgeführt. Die maximale Lastrampe stellt somit die Kraft dar, bei der das Bauteil kollabierte. Das Versuchsregime wurde nach der Machbarkeitsstudie bezüglich der Schallemissionsmessungstauglichkeit während der zyklischen Belastungstests auf der Universalprüfmaschine um die Niederlastprüfung nach jeder zerstörenden Laststufe ergänzt. Die als Proof-Loads (1 kN bis 5kN Lastrampen) bezeichnete Niederlastprüfung wurde zwischengeschaltet um zu klären, ob sich die Änderungen in den Schallemissionsparametern nach weiterführender zerstörender Laststufen gleichermaßen bei den Proof-Loads abzeichnen. Dies ist vor allem im Hinblick auf eine Zustandsbewertung eines Bauteils von großer Bedeutung, bei dem man die Belastungshistorie nicht kennt und keine regelmäßigen Schallemissionsmessungen durchgeführt hat. Das Versuchsregime bei den Tests auf der Universalprüfmaschine mit den Demonstratorbauteilen CFK-Rad beinhaltete somit einen zerstörenden und nicht zerstörenden Anteil. Exemplarisch hierzu sind in Anhang Abbildung 56 bis Anhang Abbildung 59 und Anhang Tabelle 12 die Darstellungen der

Ergebnisse eines gesamten Versuchsregimes für die Schallemissionsanalyse während quasi-statischer Belastungstests an einem rotationssymmetrischen Demonstratorbauteil (CFK-Rad) mit unterschiedlichen Parameterdarstellungen aufgeführt.

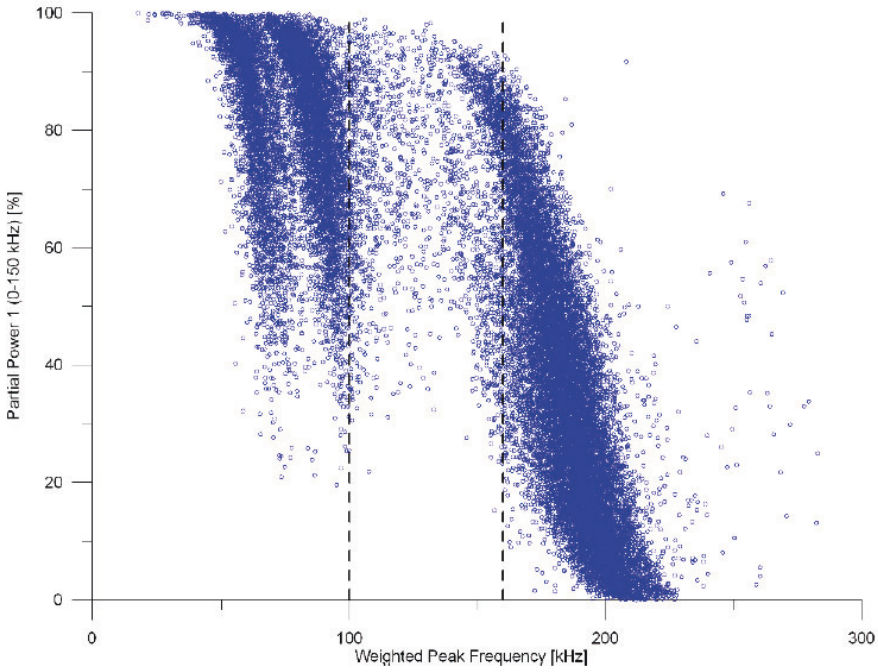


Abbildung 5.4-29 WPF-PP-Plot einer Messkampagne eines CFK-Rades mit Lasteinträgen auf Speiche 1, 3, 6

In Abbildung 5.4-29 ist die partielle Leistung in Abhängigkeit von der gewichteten Vorzugsfrequenz der Schallemissionsereignisse einer durch die Schallemissionsmessung begleiteten quasi-statischen Bauteilprüfung dargestellt. Es fällt auf, dass sich im Gegensatz zu den WPF-PP-Plots der Ergebnisse aus den Couponversuchen lediglich ein Cluster in den höheren Bereichen der gewichteten Vorzugsfrequenz ab ca. 160 kHz bildet, welches für die faserdominierenden Schädigungsmechanismen steht. Der Grund dafür ist die stärkere Streuung der Schallwellenanteile mit hohen Frequenzen an den Inhomogenitäten im Werkstoffverbund. Zusätzlich sind die Schalllaufwege im Bauteil länger als bei den Couponproben was dazu führt, dass am Bauteil kaum faserversagenstypische Frequenzen der Couponproben jenseits der 220 kHz am entfernten Empfängerort zu detektieren sind. Die gewichtete Vorzugsfrequenz der Burstsignale bei Bauteiluntersuchungen, auch wenn sie in anderen Frequenzbereichen liegt als bei Couponversuchen im Labormaßstab, weißt ebenfalls auf verschiedene Schädigungsarten hin. So sind im niederfrequenten Bereich bis ca. 100 kHz (im Folgenden blaue Farbcodierung im WPF-PP-Plot) die matrixdominierten Schädigungsmechanismen und Reibgeräusche bestehender Schäden anzusiedeln und ab einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 160 kHz (im Folgenden gelbe Farbcodierung im WPF-PP-Plot) sind die faserdominierenden Schädigungsmechanismen anzusiedeln. Der Zwischenbereich (weiss farbkodiert) wurde von 101 kHz bis 159 kHz gewählt und dient der eindeutigen Trennung der zwei „Hauptcluster“, die sich hinsichtlich der unterschiedlichen Schädigungsmechanismen genau trennen lassen. Diese deutliche Trennung der Cluster geht gleichermaßen aus Abbildung 5.4-29 hervor. Diese Trennung der Cluster bei den durchgeführten Bauteilversuchen mit Schallemissionsmessungsbegleitung ermöglicht die reduzierte Betrachtung der gewichteten Vorzugsfrequenz zur Einordnung der verschiedenen Schädigungsmechanismen, wohingegen bei den Couponversuchen eine Aussage nur in Kombination mit der Betrachtung der partiellen

Leistung möglich war. So sind im Rahmen von ermüdenden Belastungstests, wie beispielsweise durch die BUP oder eine umlaufende quasi-statische Belastung, eine zeitliche Weiterentwicklung von Faser-Matrix oder faserdominierenden Schädigungsmechanismen, die den höherfrequenten Bereichen der WPF zugeordnet werden können, zu verstärkter Reibung im niederfrequenten Bereich zu verzeichnen. Dies lässt den Schluss zu, dass neue Schäden, die oft auch in neu entstandenen Hauptbelastungszonen detektiert werden können, mit der WPF-Darstellung als höherfrequente Schallemissionsereignisse einhergehen und bestehende Schäden und die dadurch entstandenen Reibgeräusche bei weiterführender Belastung durch eine niederfrequente Charakteristik bei der gewichteten Vorzugsfrequenz gekennzeichnet sind. In den zwei Darstellungen in Abbildung 5.4-30 und Abbildung 5.4-31 ist vergleichend die gewichtete Vorzugsfrequenz der Burstsignale bei quasi-statischen Belastungstests einmal bei den Proof-Loads und einmal bei den belastenden Zyklen exemplarisch dargestellt. Man erkennt deutlich, dass die Niederlastprüfung vergleichbare Schallemissionen in den geschädigten Bereichen emittiert und mit den Schädigungsmechanismen korreliert mit denen in der Darstellung der rein belastenden Zyklen. Die nachfolgende Tabelle erläutert den Versuchsablauf des geprüften Rades.

Position Speiche Lasteinleitung (auf 12 Uhr)	**Lastzyklen im Bereich**	**Prüflastzyklen nach jeder Laststufe im Bereich**
S5	$F=(F_{max}/2)kN$	F=(1…5)kN
S2	$F=(F_{max}/2)kN$	F=(1…5)kN
S8	$F=(F_{max}/2)kN$	F=(1…5)kN
S5	$F=(F_{max})kN$	F=(1…5)kN
S2	$F=(F_{max})kN$	F=(1…5)kN
S8	$F=(F_{max}+1/10F_{max})kN$	F=(1…5)kN

Tabelle 5.4-2 Übersicht Versuchsablauf Radprüfung für Rad K074/16-02

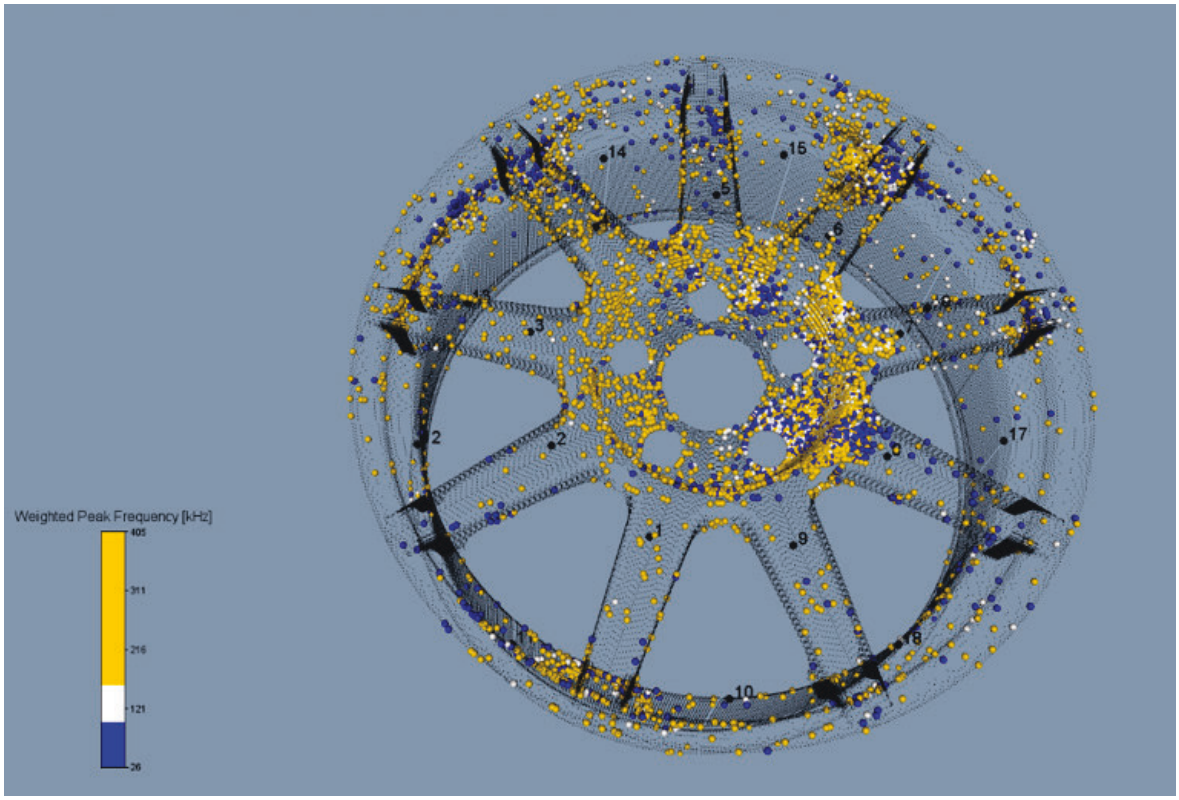


Abbildung 5.4-30 WPF-Plot einer Messkampagne mit umlaufender Belastung bei den Proof-Loads

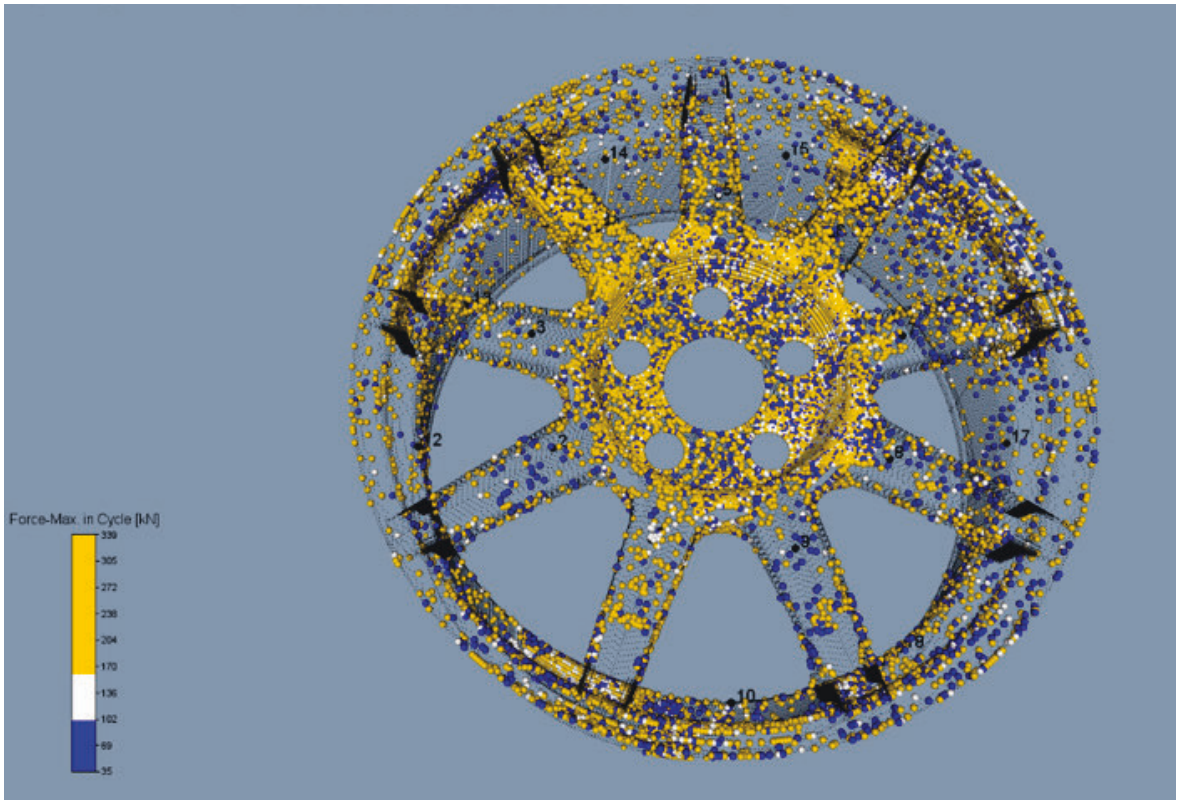


Abbildung 5.4-31 WPF-Plot einer Messkampagne mit umlaufender Belastung bei den Load-Zyklen

Die grafische Darstellung weiterer Schallemissionsparameter der Bauteilversuche verhilft zu zusätzlichen Erkenntnissen. Darunter fällt beispielsweise die farbcodierte Darstellung der Anzahl der georteten Ereignisse in den ca. 1 mm^3 großen Voxeln (=Schadensort), die

Lasteintragsortszuordnung (=Strukturantwort an Position X durch AE-Aktivität nach Lasteinleitung in Y), Lastzyklenzuordnung (=Zeitpunkt der Schadensenstehung) und die Zuordnung zur Maximalkraft des jeweiligen Versuchsregimes beim Emittieren des Schallereignisses. In nachstehender Abbildung 5.4-32 sind die Darstellungsvarianten exemplarisch für ein CFK-Rad aufgeführt.

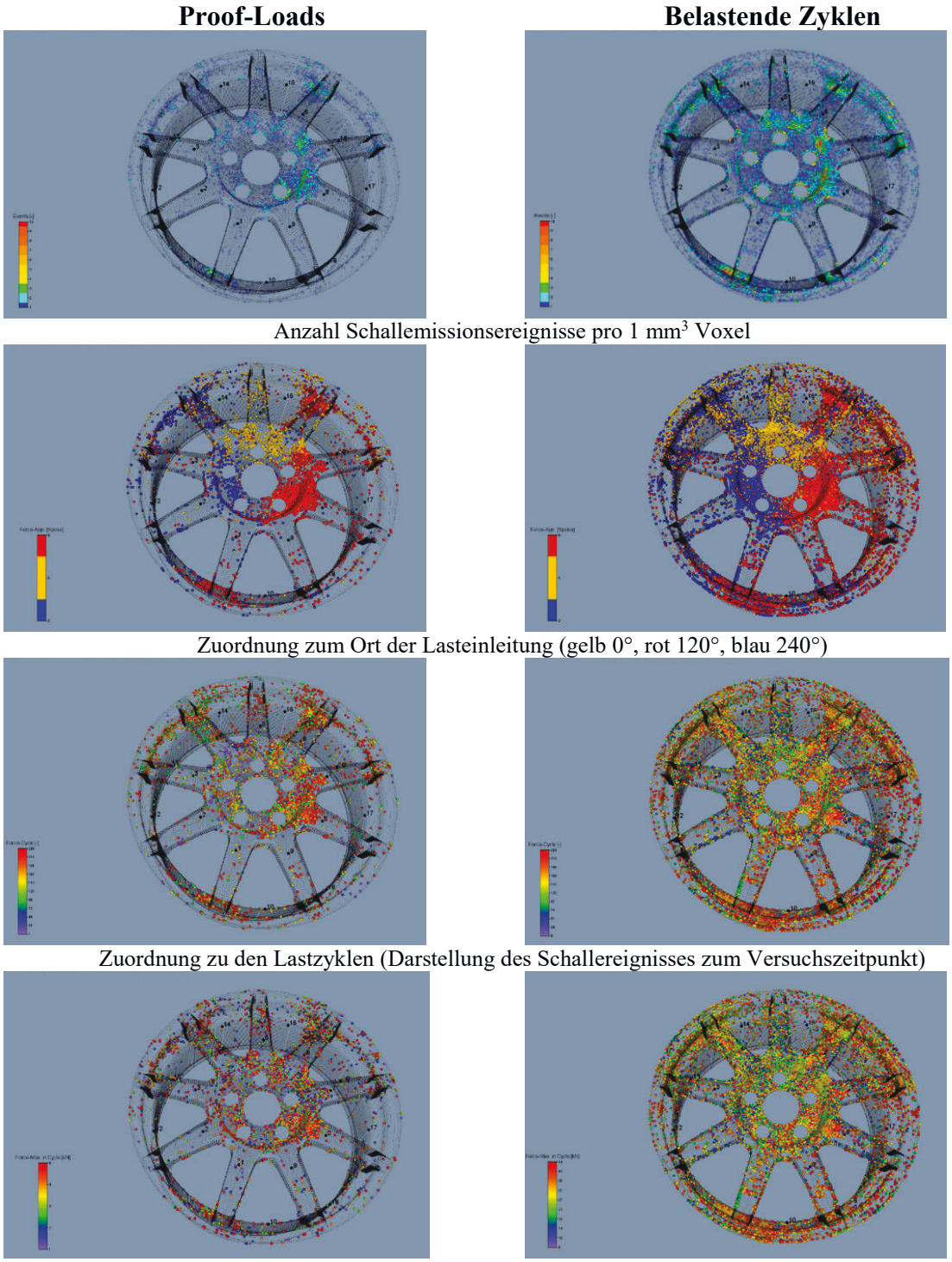
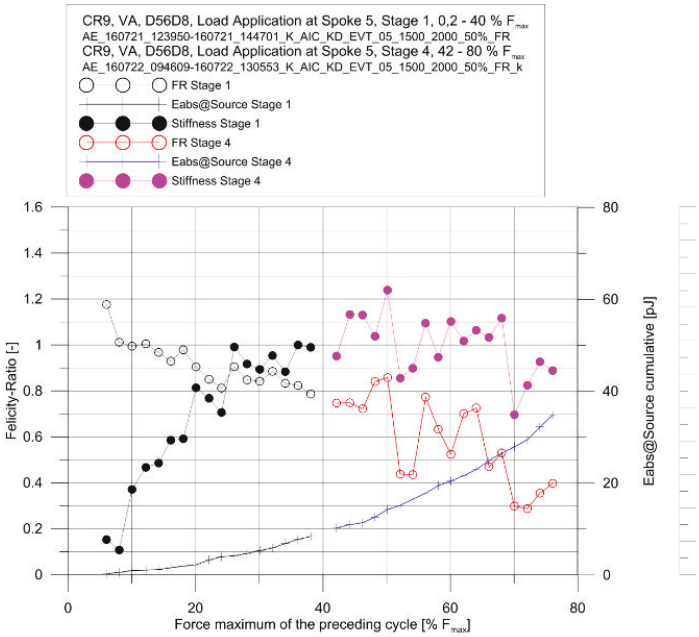
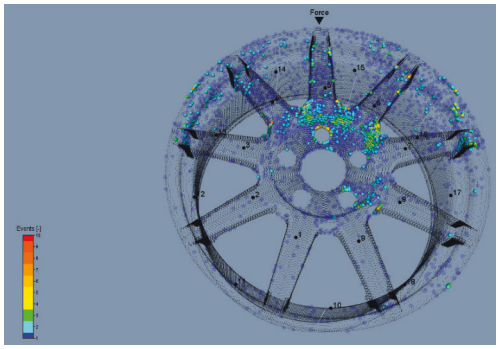


Abbildung 5.4-32 Beispielübersicht verschiedener Darstellungsvarianten der Schallemissionsparameter im Bauteil

Für die Diskussion der Schallemissionsereignisse im Hinblick auf deren Zusammenhang zu den verschiedenen Bauteilschäden war allerdings die gewichtete Vorzugsfrequenz in der Bauteildarstellung am aussagekräftigsten.

Gleichwohl kann für die Beurteilung des Bauteilzustandes das Felicity-Ratio bei Versuchen an Bauteilen herangezogen werden. Der Unterschied zu Bauteilen aus metallischen Werkstoffen ist genauso vorhanden wie bei den Versuchen auf Couponebene. Es sei kurz erwähnt, dass bei Bauteilen aus metallischen Werkstoffen bei Belastungen bis zum Überschreiten der vorherigen maximalen Laststufe die Schallemissionen ausbleiben (Kaiser-Effekt). Erst beim signifikanten Weiterschädigen stellen sich Schallemissionsaktivitäten vor dem Erreichen der zuvor beaufschlagten Maximallast ein (Felicity-Verhalten mit eindeutiger Interpretationsmöglichkeit bezüglich des Schädigungsgrads- und Fortschritts). Bei inhomogenen Verbundwerkstoffen treten signifikante Schallemissionen bereits vor dem Erreichen der zuvor erreichten Maximallast auf. Dieser als Felicity-Effekt bekannte Wirkmechanismus kann zu großen Teilen Reibvorgängen im vorgeschädigten Verbundwerkstoffmaterial zugeordnet werden. Der Großteil der bei den Belastungstests detektierten Burstereignissen wurde im Bereich der Lastmaxima verzeichnet. Aus der bei den quasi-statischen Versuchen je Laststufe umgesetzten kumulierten Energie und dem jeweiligen Zeitpunkt der vor der vorherigen, maximalen Last erfassten signifikanten Schallemissionsereignissen kann die Intensität der Werkstoffschädigung pro Belastungszyklus abgeschätzt werden. Dabei errechnet sich das Felicity-Ratio bei ansteigenden Lastrampen als Quotient der Kraft, bei der beim Ansteigen der Last signifikante Schallemissionen auftreten, und der Maximallast des jeweils vorangegangenen Lastzyklus.





Parametersprung be F=40% F_{max} durch zwischenzeitliche Belastung an Speiche 2 mit 1-40% F_{max} und Speiche 8 mit 1-40% F_{max}

Abbildung 5.4-33 Felicity-Ratio mit Steifigkeitswert bei Bauteilversuch an CFK-Rad

Exemplarisch ist in Abbildung 5.4-33 der Verlauf des Felicity-Ratio mit den aus den Maschinendaten errechneten Steifigkeitswerten und den dazu gehörenden kumulierten Energien eines gesamten Belastungsversuches einer einzelnen Speiche bis zum Versagen dargestellt. Es zeigte sich im Ergebnis der quasi-statischen Belastungsversuche, dass sich zusätzlich zum Felicity-Ratio die kumulierte Anzahl der georteten Schallemissionsereignisse, ferner die an den Quellort zurückgerechneten Werte der aufsummierten Burstenergie, zur

Ermittlung des Schädigungsgrades der Bauteilstruktur verwendet werden können. Neue Schäden führen bei den Proof-Loads zu einem Anstieg der Kurven der kumulierten Energie, wohingegen Reibvorgänge in bereits bestehenden Trennflächen von unterschiedlichen bestehenden Schäden ein Abflachen der Energiekurve bedeutet. Als Erläuterung dieses Verhaltens dient nachfolgende Abbildung 5.4-34.

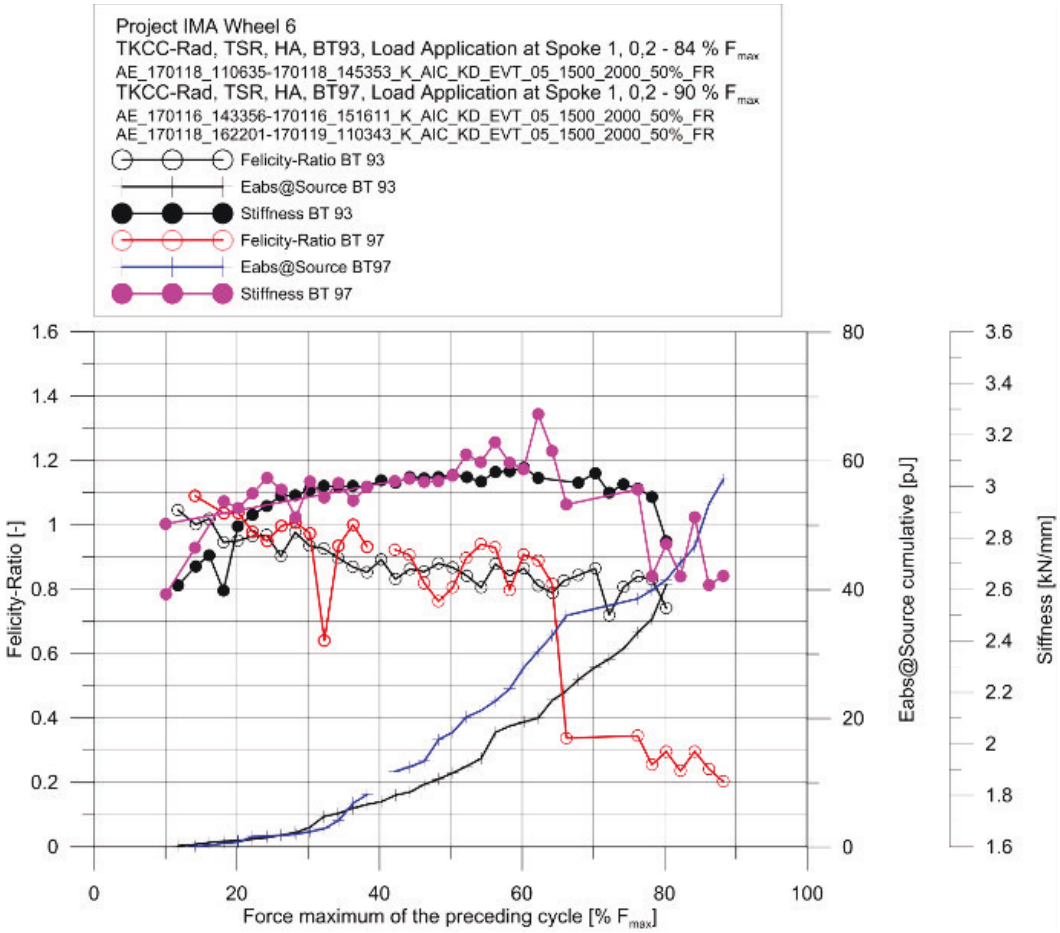


Abbildung 5.4-34 Felicitiy-Ratio, Steifigkeitswert mit kumulierter Energie CFK-Rad Bauteil 97 und Bauteil 93

Die Schallemissions-Parameter Felicity-Ratio und die kumulierte akustische Energie zeigen für das Bauteil 97 bereits in der Lastrampe bei ca. 62% von F_{max} deutliche Indikationen für starke Schädigungen im Rad. Insbesondere das Felicity-Ratio fällt sprunghaft ab. Ein signifikanter Steifigkeitsabfall ist in diesem Beispiel erst nach Erreichen von ca. 78% von F_{max} zu erkennen. In diesem Fall kann die Schallemissionsanalyse für das Bauteil 97 frühzeitiger (ab ca. 62% F_{max}) das Entstehen von neuen Schädigungen (potentiell strukturrelevant) prognostizieren.

Die geprüften Räder zeigten teilweise stark unterschiedliche Signalantworten bei gleichem Versuchsregime, obwohl sie demselben Bauteilentwicklungsstand entsprachen. Dies ist in den nachfolgenden zwei Grafiken (Abbildung 5.4-35 und Abbildung 5.4-36) deutlich zu erkennen, die die Ergebnisse einer Messkampagne, bei der über die Speiche 1 die Last eingeleitet wurde, von zwei baugleichen, identisch geprüften Rädern im Proof-Load-Bereich (1 kN 5 kN) darstellt.

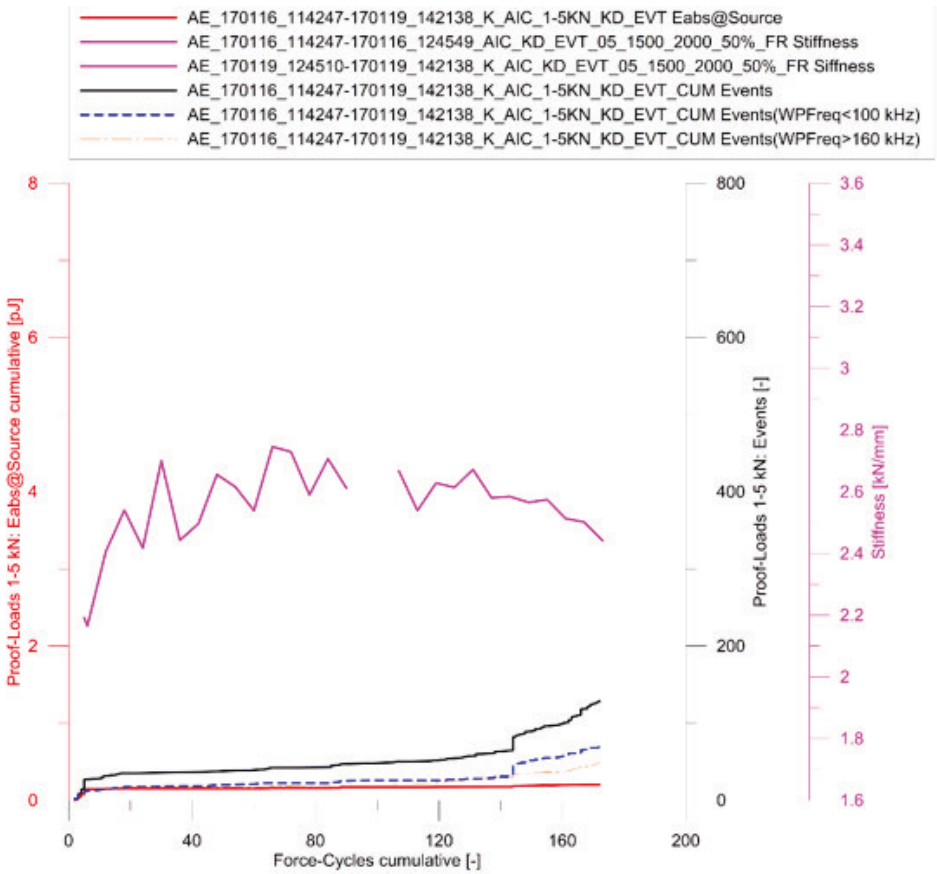


Abbildung 5.4-35 Proof-Load Messkampagne an Speiche 1 BT 95

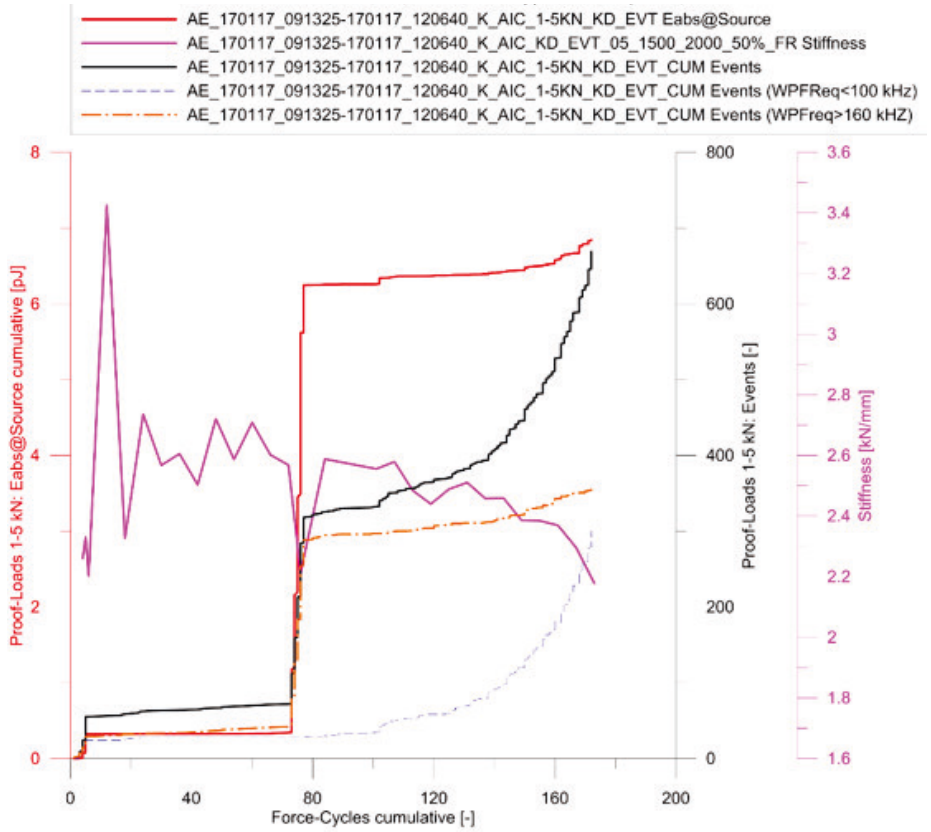


Abbildung 5.4-36 Proof-Load Messkampagne an Speiche 1 BT 102

Die Energie der Schallemissionssignale zurückgerechnet auf den Quellort ist rot , die Steifigkeit magenta, die Schallemissionsrate schwarz, die Schallemissionsrate von Events mit maximal gewichteter Vorzugsfrequenz (bis 100 kHz) blau und die Schallemissionsrate von Events mit minimal gewichteter Vorzugsfrequenz (ab 160 kHz) orange farbcodiert. In Abbildung 5.4-36 ist im Vergleich zu Abbildung 5.4-35 ein deutlicher, sprunghafter Anstieg bei der Proof-Load-Schallemissionsrate und bei der Proof-Load-Energiekurve erkennbar. Dieses Verhalten kann als frühzeitiger Schadensindikator zur Klassifizierung besser tragender und schlechter tragender (lasttragender) Komponenten oder Bereichen in Bauteilen genutzt werden. Bei den Untersuchungen an den Rädern bezieht sich das hauptsächlich auf das differente Tragverhalten der Speichen. Somit zeigt ein starker oder sprunghafter Anstieg der Proof-Load-Energiekurve einer Raduntersuchung schneller die schlechter tragenden Bauteilbereiche auf als die Steifigkeitsuntersuchung und der damit zwingend gemessene Steifigkeitsabfall. Dieses Phänomen ist ein elementarer Vorteil der Schallemissionsanalyse im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren, da eine Art Prognose über das weitere Bauteilverhalten erstellt werden kann, da die Hauptschädigungsbereiche frühzeitig ermittelt werden können.

Vergleicht man zusätzlich die Ergebnisdarstellung der erweiterten Versuchsreihe an jeweils zwei baugleichen Vorderachs- und Hinterachsrädern, werden während der Belastung zwei unterschiedliche Schädigungsverläufe deutlich, die mit der Schallemissionscharakteristik korrelieren. In Abbildung 5.4-37 sind die Steifigkeitsverläufe in magenta und die Energie kumulativ in Abhängigkeit von der Lastzyklenzahl zu diesen Versuchsreihen abgebildet.

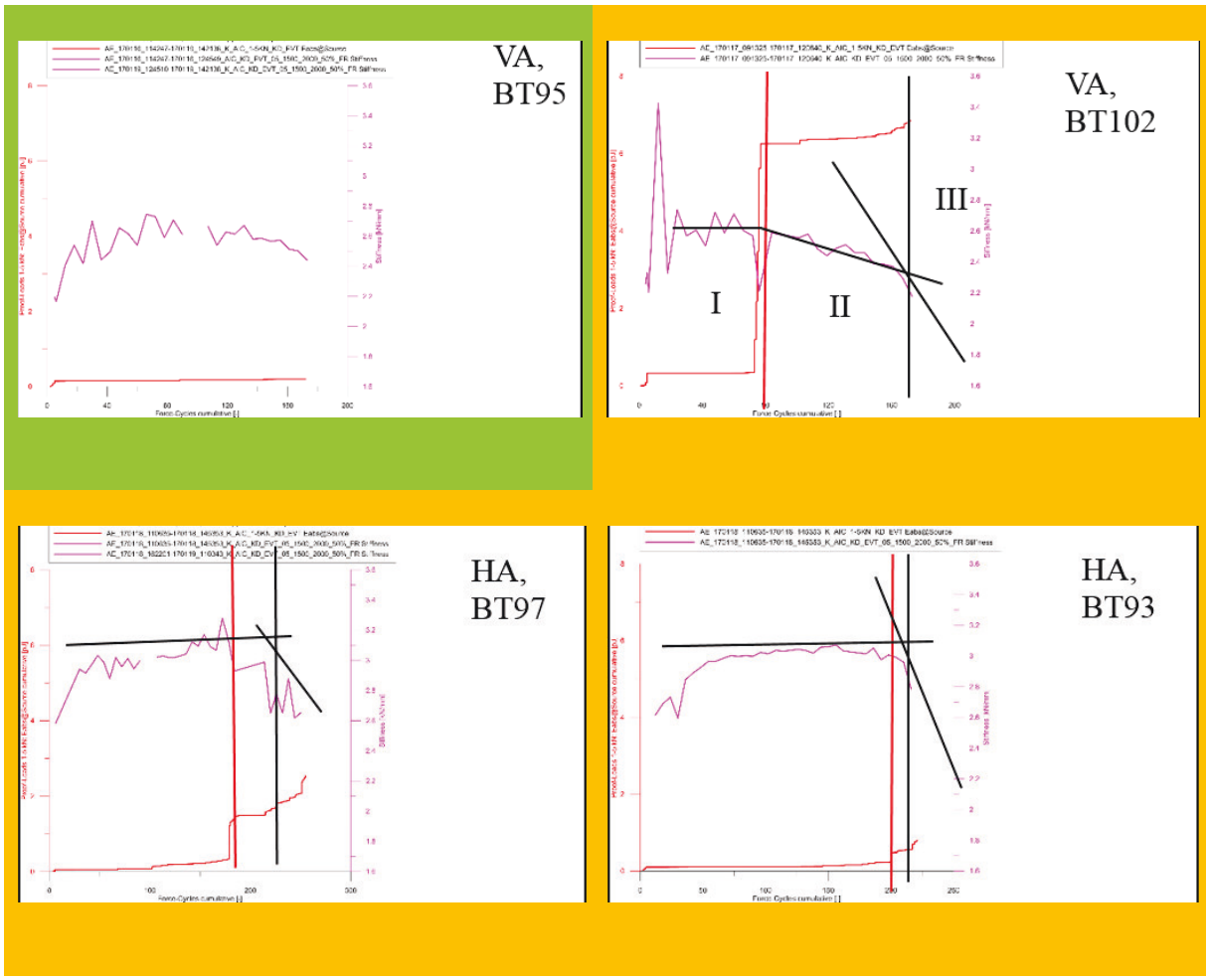
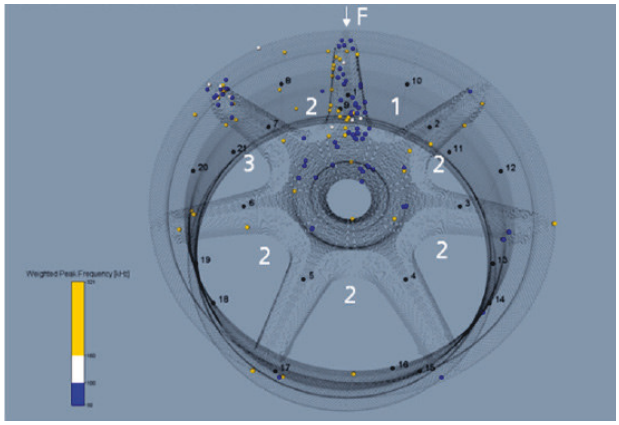


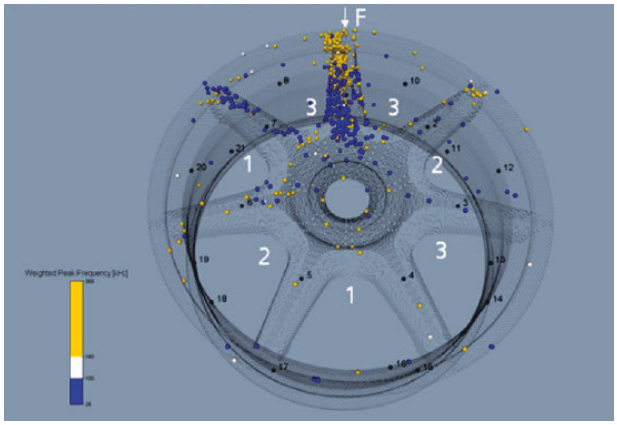
Abbildung 5.4-37 Energieverlauf bei Proof-Load-Belastungen

Die Ergebnisse von Rad 95 lassen im Vergleich zu denen der anderen Räder auf eine sehr gute Fertigungsgüte von Rad 95 schließen, da es keinen abrupten Anstieg der kumulierten Energie gibt. Die anderen drei Räder zeigen, wenn auch unterschiedlich ausgeprägt, starke sprunghafte Anstiege der Energiekurve im Versuchsverlauf, was als frühzeitiger Hinweis auf schädigende Mechanismen im Bauteil schließen lässt. Deutlich wird dies durch die bei BT 102 eingezeichneten Bereiche, die mit den römischen Ziffern I, II und III bezeichnet wurden. Bereich I weist einen relativ konstant bleibenden Steifigkeitswert auf, der erst in Bereich II nach dem ersten deutlichen Anstieg der Energie abfällt. In Bereich III gibt es einen weiteren Abfall des Steifigkeitswertes, der mit zuvor gestiegenen kumulierten Energiewerten korreliert.

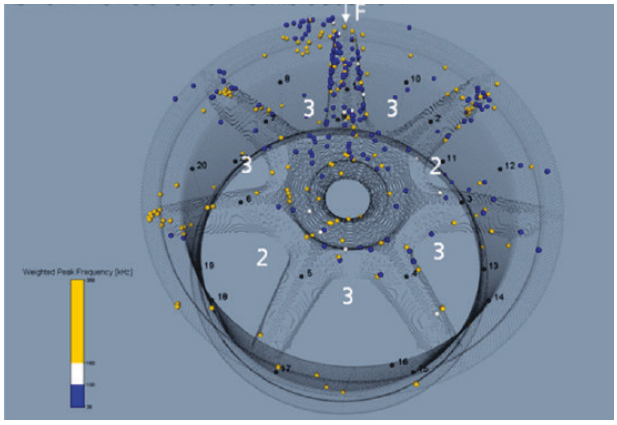
Es sind nicht bei allen Darstellungen alle drei Bereiche zu erkennen. Sofern der Energiesprung am Ende der Versuchsreihe zu finden ist, gibt es lediglich zwei Bereiche und das Bauteil versagt. Die Unterschiede der Räder sind in diesem Zusammenhang auf fertigungsinduzierte Abweichungen oder schwankende Fertigungsqualitäten zurück zu führen, auch weil die Demonstratorbauteile aus der laufenden Radentwicklung stammten. Im Zuge der Arbeit konnten die durch die Schallemissionsanalyse aufgezeigten unterschiedlichen Trendverläufe der korrelierenden Energie- und Steifigkeitskurven, die auf fertigungsbedingte Fehlstellen in tragenden Bereichen der Bauteile hinweisen, mit einem zusätzlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren nachgewiesen werden. Aus Geheimhaltungsgründen ist es nicht möglich, die übereinstimmenden Aufnahmen in dieser Arbeit zu veröffentlichen [55]. Deshalb wurde in den vier nachfolgenden Darstellungen Abbildung 5.4-38 der Grad, der bei der Röntgenprüfung ermittelten Schädigungen (Delaminationen, Matrixschäden, etc.) mit eingetragenen Stufen von 1 = nicht erkennbar bis 5 = deutliche erkennbar eingetragen. Der Vergleich mit den Ortungsplots in der WPF-PP Darstellung zeigt zusätzlich den deutlichen Unterschied der Fertigungsqualität und den Unterschied zwischen den Vorderachs- und Hinterachsrädern.



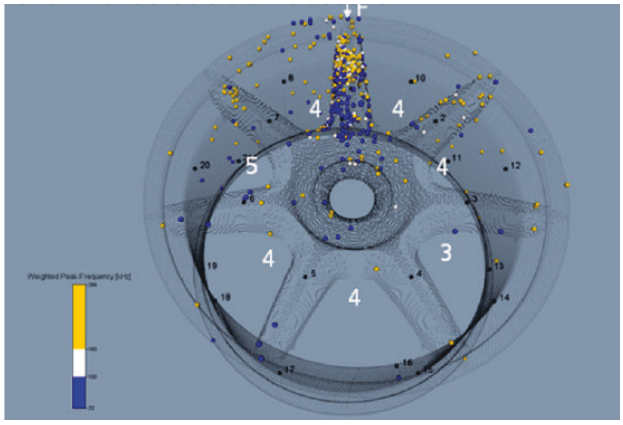
BT 95; Lasteintrag Speiche 1; 1-18% Fmax, 19-72% F_{max}



BT 102; Lasteintrag Speiche 1; 1-18% Fmax, 19-72% F_{max}



BT 93; Lasteintrag Speiche 1; 1-18% Fmax, 19-93% F_{max}



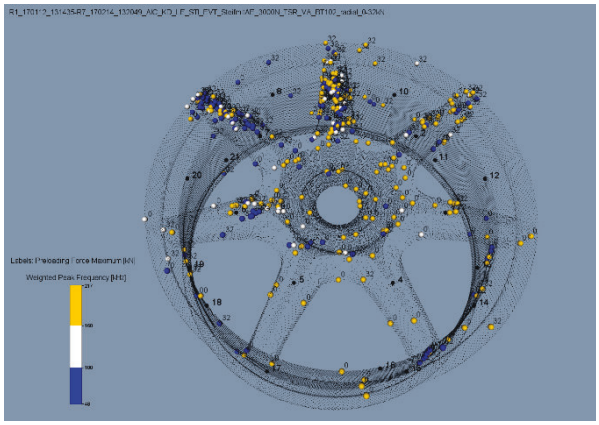
BT 97; Lasteintrag Speiche 1; 1-18% Fmax, 19-100% F_{max}

Abbildung 5.4-38 WPF-PP-Ortungsplots und Bereichseinteilung; Grad der Schädigung ermittelt durch Röntgenprüfung

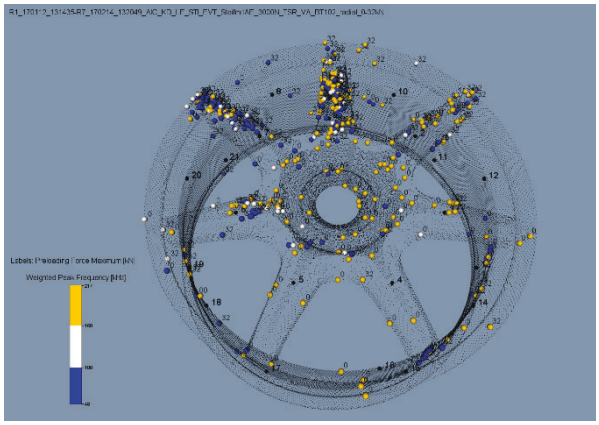
Es lässt sich gemäß den in Abbildung 5.4-38 erläuterten Ergebnissen eine Einteilung hinsichtlich des Bauteilzustandes auf Basis der Schallemissionsanalyse durchführen: I.O. Bauteile ohne starken Anstieg des Energieverlaufes und n.i.O. Bauteile, bei der die tragenden Bereiche frühzeitig (verhältnismäßig niedrige Lasten) geschädigt werden, was zu einem Anstieg der Energie während des Versuchsverlaufes führt. Diese zwei grundlegenden erfassten Schädigungsweisen in diesem rotationsymmetrischen Bauteil wurden mit einer grünen Umrandung für die i.O.-Bauteile und mit einer orangenen Umrandung für die n.i.O.-Bauteile in Abbildung 5.4-37 farbcodiert. Die Einteilung i.O. und n.i.O. hat keinen Zusammenhang mit der Tragfähigkeit der getesteten Bauteile, sondern dient nur zur Einordnung der diskutierten Versuchsergebnisse.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass bei der Interpretation der Schallemissionsanalyse bei Messungen an komplexen Bauteilgeometrien genauso wie bei Messungen auf Couponebene immer mehrere Schallemissionsparameter spezifisch ausgewertet und betrachtet werden müssen, um eine verlässliche Aussage zur Strukturintegrität, geschädigten Bauteilbereichen und den damit verbundenen Lastumlagerungen, Schädigungsart und Schädigungsgrad treffen zu können. Folglich ist die Schallemissionsanalyse im Rahmen von Steifigkeitsuntersuchungen und quasi-statischen Belastungstests während der Produktentwicklungsphase eines Bauteils aus FVKs in der Lage, Problemzonen (zu stark belastete Bereiche im Bauteil) zu visualisieren und die Aussage über die Strukturintegrität zu verbessern, sofern die Bauteile für die grundlegenden Messreihen in ausreichend statistischer Menge zur Verfügung stehen.

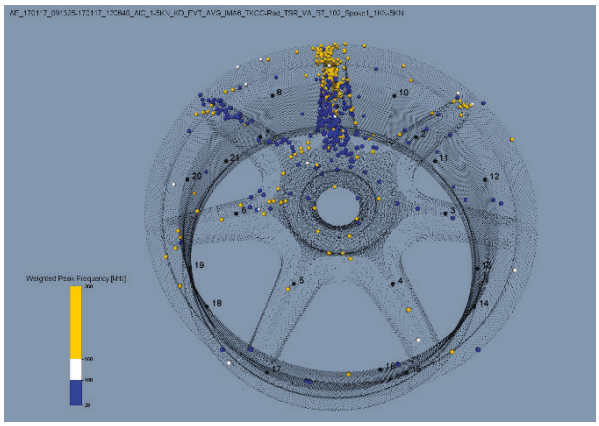
Die Ergebnisse des Steifigkeitsprüfstandes hinsichtlich der Schallemissionsaktivität von geprüften Rädern stimmen mit den Ergebnissen der jeweiligen Proof-Load-Prüfung überein. Am Steifigkeitsprüfstand wurde radial und axial mit drei wiederholenden Lastrampen bis 3 kN axial und radial umlaufend geprüft. Das Kraftniveau ist somit am Steifigkeitsprüfstand im Vergleich zur Universalprüfmaschine um 2 kN geringer. In Tabelle 5.4-3 sieht man, dass bei beiden Varianten der Niederlastprüfung dieselben geschädigten Bereiche des Bauteils nach vorangegangenen schädigenden Belastungszyklen zu erkennen sind.



Steifigkeitsprüfstand Proof-Load-Zyklen (1-3 kN) axial



Steifigkeitsprüfstand Proof-Load-Zyklen (1-3 kN) radial



ZWICK IMA Proof-Load-Zyklen (1-5 kN)

- Vergleichbare Ergebnisse bei Proof-Loads hinsichtlich Frequenzverteilung der WPF
- Vergleichbare Ergebnisse bei Proof-Loads hinsichtlich Bereichsidentifikation

Tabelle 5.4-3 Vergleichende Darstellung der Schallemissionsaktivität bei Proof-Loads an Steifigkeitsprüfstand und Universalprüfmaschine; farbcodiert ist die gewichtete Vorzugsfrequenz

Beide Niederlastprüfvarianten liefern vergleichbare Ergebnisse im Hinblick auf die Schallemissionsanalyse. In weiteren Ergebnisdarstellungen wird hauptsächlich auf die Niederlastprüfergebnisse der Universalprüfmaschine zurückgegriffen. Dies war dem Umstand geschuldet, dass man die Prüflinge nicht umspannen musste und somit auch keine Varianz bezüglich der Bauteilspannung etc. mit eingeflossen ist. Zusätzlich konnten dadurch Kosten in der Versuchsdurchführung gesenkt werden. Auch bei der Schallemissionsanalyse bei Versuchen am Steifigkeitsprüfstand ist es möglich, zusätzliche Parameter auszuwerten. Exemplarisch findet man in Anhang Tabelle 13 die Darstellung unterschiedlicher Schallemissionsparameter, die beim Niederlastprüfverfahren auf dem Steifigkeitsprüfstand ermittelt wurden. Die vergleichende Darstellung in Tabelle 5.4-3 dient der Messmittelbefähigung der Universalprüfmaschine in Bezug auf den Niederlastprüfbereich.

Die Schallemissionsmessung begleitend zur BUP war mit angepassten Filteralgorithmen in den Schallemissionsmessprogrammen und in den Auswerteprogrammen möglich. Im Speziellen werden bei der BUP viel höhere Energieniveaus bei den Burstsignalen erreicht und dies muss bei der Weiterverarbeitung der Schallemissionssignale berücksichtigt werden. Es wurden rotationssymmetrische Demonstratorbauteile mit unterschiedlichen Momenten für das Abdecken des Niederlastprüfbereiches zwischen den eigentlichen belastenden Schädigungsmomenten geprüft. In nachfolgender Tabelle 5.4-4 ist exemplarisch ein solches Prüfregime für ein neues Bauteil dargestellt.

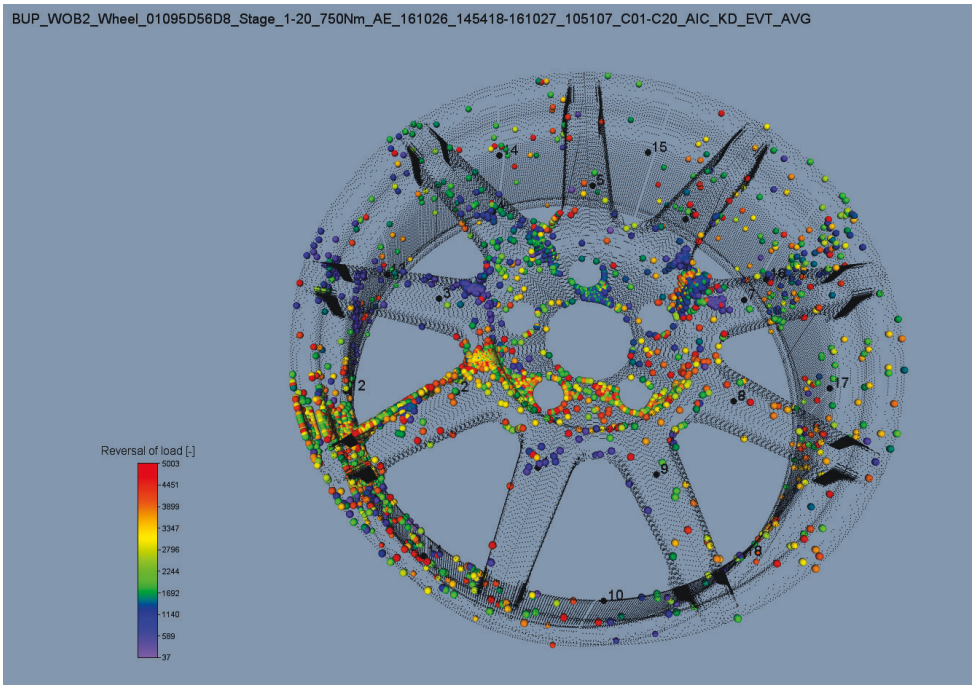
	Eingeleitetes Moment (Nm)	Anzahl Lastwechsel (LW)
Prüfzyklus 1	750	5000
	1500	5000
	3000	5000
	4200	175000
Prüfzyklus 2	750	5000
	1500	5000
	3000	5000
	4200	50000
Prüfzyklus 3	750	5000
	1500	5000
	3000	5000
	4200	39860 + 40000
Prüfzyklus 4	750	5000
	1500	5000
	3000	5000

Tabelle 5.4-4 Exemplarisches Prüfregime BUP

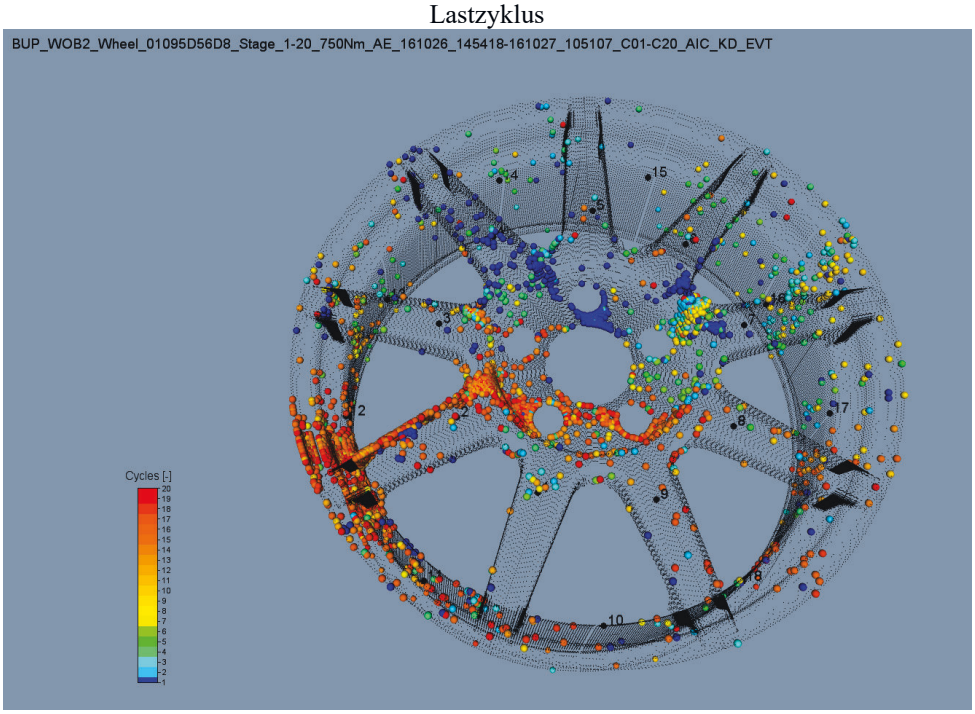
Daraus geht hervor, dass grundsätzlich vergleichend geprüft wurde, wie bei den quasi-statischen Belastungstests auf der Universalprüfmaschine, und deshalb abwechselnd schädigende (hohes Moment) und nicht schädigende oder nicht weiter schädigende (niedriges Moment) Belastungsmomente in den Prüfling eingebracht wurden. Beispielhaft ist in

Anhang Tabelle 14 eine gesamte Messreihe eines Rades dargestellt, welches mit dem in Tabelle 5.4-4 dargestellten Versuchsregime geprüft wurde. Die Auswertung der BUP-Versuche hinsichtlich der Schallemissionsanalyse ergab, dass der BUP-Prüfstand bei niedrigen Biegemomenten unterschiedliche Bereiche in der geprüften Struktur anregte und keine reproduzierbaren Ergebnisse im Niederprüflastmomentbereich lieferte. Die Ergebnisse der Schallemissionsmessung im Niederlastprüfmomentbereich sind dabei abhängig von folgenden Punkten.

- Eingestelltem Prüfdrehmoment (750, 1500, 3000 Nm, etc.).
- Prüfstandbedingt wird hauptsächlich im Nabenbereich bei niedrigen Prüfmomenten geschädigt.
- Umdrehung, Biegemoment und Auslenkung korrelieren linear (niedrige Drehzahlen führen zu Schallemissionen in einigen Speichenanbindungen).
- Höhere Biegemomente regen stärker Felgenbett und Außenhorn an.



Farbcodiert ist der 750 Nm Lastzyklus der Messkampagne über die Lastwechsel im Lastzyklus



Farbcodiert ist der 750 Nm Lastzyklus der Messkampagne über die Einzellastzyklen
Abbildung 5.4-39 Schallemissionsereignisse nach 20-facher BUP-Anregung bei 750 Nm mit je 5000 LW

Das in Abbildung 5.4-39 dargestellte Messbeispiel ist ein Beleg dafür, dass die BUP in der gewählten Versuchskonfiguration nicht zur reproduzierbaren Anregung von Niederlastprüfmomenten (Proof-Loads) geeignet ist. Das Ziel, die Biegeumlaufprüfung als Ersatz für die nicht weiter schädigenden Zwischenprüfungen am Steifigkeitsprüfstand zu verwenden, konnte nicht erfüllt werden. Dagegen ist die BUP begleitet mit der Schallemissionsanalyse während schädigenden Momenten durchaus in der Lage, die Hauptschädigungsbereiche in der Struktur zu identifizieren.

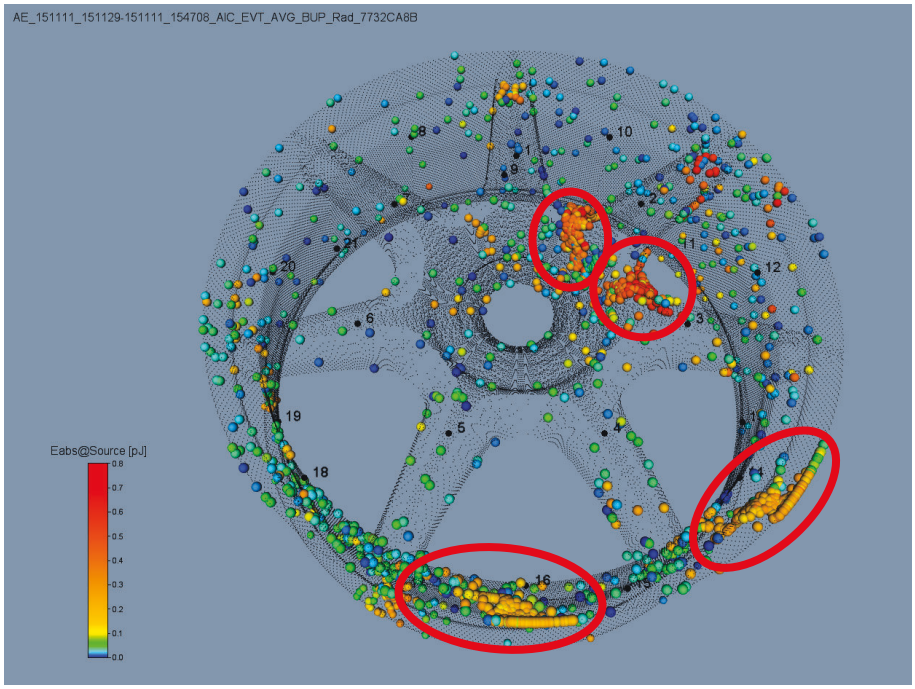


Abbildung 5.4-40 Schallemissionssignale während schädigender BUP; Schallemissionsparameter ist Burstenergie am Quellort

In den durch rote Kreise gekennzeichneten Bereichen sind Hauptschädigungsbereiche zu erkennen. Dort kann eine Aussage über den Ort und die Art der Schadensentwicklung getroffen werden. Auch hier gibt die gewichtete Vorzugsfrequenz Hinweise auf die Art der Schäden. Reibgeräusche und Delaminationen zeichnen sich dabei durch niederfrequente Burstsignale ab, Debonding und Faserrisse durch höher- und hochfrequente Signale. Bei den Ergebnissen der Messung während schädigender Lasten ist der Beginn der Bildung neuer Schäden durch eine Anhäufung von Schallemissionssignalen mit tendenziell höherer Vorzugsfrequenz gekennzeichnet, wohingegen, wie bei den Schallemissionsergebnissen der quasi-statischen Prüfungen auf der Universalprüfmaschine, bestehende Schäden durch niederfrequente Schallemissionen charakterisiert sind. Die Zuordnung von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen zu verschiedenen Frequenzbereichen der gewichteten Vorzugsfrequenz ist somit auch bei den Ergebnissen der schallemissionsbegleitenden Messungen auf der BUP möglich (Anhang Tabelle 14).

Die Hauptergebnisse und Anforderungen der Schallemissionsanalyse während Versuchsreihen an schädigender BUP, quasi-statischer und zyklischer Belastungstests und begleitenden Schallemissionsmessungen bei der Steifigkeitsprüfung an rotationssymmetrischen Demonstratorbauteilen (CFK-Räder) sind:

- Belastungskonzept für die Niederlastprüfung (Steifigkeitsprüfstand und Niederlastanteil / Proof-Loads bei den quasistatischen Belastungstests auf der Universalprüfmaschine) muss dem statistischen Charakter der Schallemissionsanalyse Rechnung tragen.
- Für ein spezifisches Messregime in Kombination mit korrelierenden Schadensbildern muss eine ausreichende Lastrampenanzahl und Laststärke (am besten zyklisch) ermittelt und als Prüfstandard definiert werden.

- Proof-Loads emittieren vergleichbare und korrelierende Schallemissionen in den geschädigten Bereichen der Demonstratorbauteile wie die, die bei den schädigenden Lasten auftreten.
- Schadensmechanismen in Proof-Load und Load-Anregung stimmen für definierte Bauteilbereiche überein.
- Unterschiede in den Ergebnissen im Vergleich von neuwertigen Bauteilen zu geschädigten sind vor allem in der Frequenzverteilung erkennbar.
- Kurven der kumulierten Schallemissionsrate und Burstenergie zeigen einheitlichen und guten Trendverlauf.
- Abrupter Anstieg der Proof-Load Schallemissionsrate und / oder der Proof-Load Energiekurve ist ein frühzeitiger Indikator zur Bereichsklassifizierung von „gut tragenden“ und „schlecht tragenden“ Bereichen im Bauteil.
- Anstieg der Proof-Load-Energiekurve weist vor dem Abfall der Steifigkeit auf ein Nachlassen der Strukturintegrität des Bauteils hin.
- Anstieg der Schallemissionsrate nach schädigenden Lasten war ebenfalls auf dem Steifigkeitsprüfstand erkennbar (ausschließlich im Niederlastbereich genutzt); Korrelation der Aussage mit Felicity-Ratio.
- Schadensmechanismus zuordenbare Eventkurven mit unterschiedlichen Schädigungsmechanismen visualisieren Zeitpunkte mit kurzfristigem Versagen von Bauteilbereichen.
- Während der Steifigkeitsprüfung kann die begleitend eingesetzte Schallemissionsanalyse zerstörungsfrei den Ort und die Art / den Grad der Vorschädigungen aufzeigen.
- Während der schädigenden BUP kann die begleitend eingesetzte Schallemissionsanalyse zerstörungsfrei den Ort und die Art / den Grad der Vorschädigungen aufzeigen.
- Während der nicht schädigenden BUP kann die begleitend eingesetzte Schallemissionsanalyse zerstörungsfrei nicht den Ort und die Art / den Grad der Vorschädigungen aufzeigen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit war die Weiterentwicklung der Schallemissionsanalyse als zerstörungsfreies Prüfverfahren für die Anwendung an faserverstärkten Kunststoffen. Dies erfolgte im Hinblick auf die Überwachung der eingesetzten Werkstoffe hinsichtlich deren Vorschädigungsgrad und deren Einfluss auf den sicheren Betrieb dieser Werkstoffe. Die Theorie der Wellenausbreitung ist aufgrund des nicht heterogenen Werkstoffes der Couponproben und Bauteilen von großer Bedeutung. Somit ist die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, die je nach geprüfter Werkstoffkombination und auch Lagenaufbau verschieden sein kann, von elementarer Bedeutung. Eine exakte Ermittlung der werkstoffspezifischen Schallausbreitungsgeschwindigkeit durch den HSU-Nielsen-Test war für diese Arbeit eine grundlegende Voraussetzung. Es wurden Schallemissionsparameter zur Identifizierung und Gruppierung hinsichtlich faserverbundwerkstofftypischen Schädigungsmechanismen auf Couponebene mit automobilrelevanten Abmessungen untersucht. Im nächsten Schritt wurde eine Zuordnung dieser Schädigungsmechanismen auf Couponebene mit Hilfe eines zusätzlichen zerstörungsfreien Messverfahrens (CT-Prüfung) erbracht. Dabei kam ein elementarer Vorteil der Schallemissionsanalyse zum Tragen, der es ermöglichte, mit verhältnismäßig geringem Aufwand während der belastenden Prüfzyklen die Schallemissionen des Faserverbundwerkstoffes aufzunehmen. Hierzu wurden aufwändige Messreihen mit in-situ-CT-Aufnahmen in statistisch relevanter Anzahl durchgeführt.

Die vorgeschalteten Messreihen ermöglichten eine detaillierte Werkstoffauswahl und Probengeometrie hinsichtlich der Abhängigkeiten von Laminataufbau, der Probendicke und der Belastungsart, sodass die erwarteten Schädigungsmechanismen eindeutig detektiert und zugeordnet werden konnten. Dabei ergab die Clusterung von Schallemissionsereignissen eine sichtbare Unterteilung der Schädigungsmechanismen auf Basis der gewichteten Vorzugsfrequenz, aufgetragen über der partiellen Leistung. Diese Darstellung, die als WPF-PP-Plot bezeichnet wurde, stellte sich als geeignetste Variante zur visuellen Unterteilung der Schallemissionssignale hinsichtlich unterschiedlicher Schädigungsmechanismen bei den untersuchten Faserverbundwerkstoffen dar. Die Ausbildung der Schädigungscluster auf Basis der Untersuchungen mit Prüfkörpern, die automobilspezifische Materialkennwerte und Abmaße (Standardproben zur Materialcharakterisierung) besaßen, wurde vor dieser Arbeit in diesem Umfang noch nicht erbracht. Des Weiteren kann das Felicity-Ratio in Kombination mit der kumulierten Energiekurve der Einzelschallemissionsereignisse für zyklische Zug- und Biegeversuche als Schadensindikator verwendet werden, um auch vorzeitig auf ein Versagen der Probe hinzuweisen. In einer Parameterstudie wurde der Einfluss von Veränderungen der Signalantwort hinsichtlich der Schallemissionsaktivität in Abhängigkeit von verschiedenen Faservolumengehalten sowie Faserfestigkeiten bei weitgehend gleichbleibendem Matrixmaterial und gleicher Geometrie während Zugversuchen betrachtet. Bei der Varianz des Faservolumengehaltes waren hauptsächlich Unterschiede bei der Schallemissionsbildung bei den unterschiedlichen Lagenaufbauten erkennbar, was die Zuordnung zu bestimmten Schädigungsmechanismen erschwerte. Im Allgemeinen war die Clusterbildung jedoch vergleichbar. Die Untersuchungen mit unterschiedlichen Faserfestigkeiten lieferten dagegen ein deutlicheres Ergebnis. Mit zunehmender Faserfestigkeit steigt die Schallemissionsaktivität im dritten Cluster, welches für faserdominierte Schädigungsmechanismen steht. Beim Versagen von höherfesten Fasern oder Faserbündel wird mehr Energie frei und die Umgebung wird stärker geschädigt, was wiederum zu weiteren Faserschäden führt. Abschließend kann

festgehalten werden, dass der Lagenaufbau einen größeren Einfluss auf die Clusterbildung hat als die Varianz des Faservolumengehaltes und höherfeste Fasern die Bildung des dritten Schädigungsclusters begünstigen.

Mit den auf Couponebene erarbeiteten Ergebnissen, vor allem mit dem eindeutigen Nachweis verschiedener Schädigungsmechanismen zu verschiedenen Bereichen von Schallemissionsparametern, wurde nun der Übertrag der Schallemissionsanalyse als zerstörungsfreies Prüfverfahren auf die Bauteilebene mit komplexeren Geometrien entwickelt. Ziel der Arbeit war es, die Schallemissionsanalyse als prüfstandsbegleitendes Bewertungsverfahren für die Integrität und den Zustand von CFK-Bauteilen anhand von Versuchen zu validieren. Hierzu wurden zwei rotationssymmetrische Bauteile als Demonstratorbauteile verwendet. Die Bauteile (CFK-Rohr und CFK-Rad) wurden mit unterschiedlichen zyklischen Belastungsregimen geprüft. Dabei war ein Schädigungsfortschritt bei den jeweiligen Belastungszyklen erkennbar. Das aus den Vorversuchen bekannte Felicity-Ratio ist für die CFK-Rohre nicht als Schadensindikator geeignet, da aufgrund des geringen Anteils von reibinduzierten Schallemissionen die Schallemissionsanalyse zu unsensibel für diese Versuchskonfiguration war. Ebenso gibt es bei der Clusterdarstellung der Schallemissionsereignisse während des Versuchs vor finalem Versagen und messbarem Momentenabfall keine deutliche Ausprägung aller drei Cluster. Vielmehr war lagenaufbauunabhängig ein Hauptcluster erkennbar, welches für Faser-Matrix-kombinierte Schädigungsmechanismen steht. Die Statistik der gewichteten Vorzugsfrequenz zeigt somit, anders als bei Fatique-Tests bei den CFK-Rädern mit Zug- Druckbelastungen, eine „eingipfelige“ Verteilung mit dem Maximum bei 200 kHz, die das Debonding als Hauptschädigungsmechanismus bestätigt. Ein sprunghafter Anstieg der Schallemissionsrate und / oder Energiekurve kann dennoch als frühzeitiger Schadensindikator genutzt werden.

Zur Erfassung von Schädigungsverläufen von CFK-Rädern, wurden mehrere Versuchsreihen mit quasi-statischen Belastungstests auf einer Universalprüfmaschine und auf der Biegeumlaufprüfmaschine mit einem umlaufenden Belastungsregime durchgeführt und mit der Schallemissionsmessung begleitet. Die Versuche wurden auch zyklisch, laststeigernd und lastabfallend bis zu einem gewissen Kraftabfall der Bauteile durchgeführt. Erweitert wurden die Versuchsreihen um eine Niederlastprüfung, bei der nach jeder zerstörenden Laststufe Proof-Loads von 1 kN bis 5 kN durchgeführt wurden. Das Ziel dieser Niederlastprüfung war die Validierung der Schallemissionsparameter, die bei den zerstörenden Lasten detektiert wurden. Konkret geht es hier um die Machbarkeitsanalyse, Schallemissionen im nicht schädigenden, zerstörungsfreien Lastbereich bei Bauteilen zu erfassen, um eine Aussage über die Strukturintegrität und den Bauteilzustand treffen zu können, was bei den Untersuchungen an den CFK-Rädern bestätigt werden konnte. Die gewichtete Vorzugsfrequenz unterteilt sich hauptsächlich in zwei Bereiche. So sind im niederfrequenten Bereich bis ca. 100 kHz die matrixdominierten Schädigungsmechanismen und Reibgeräusche bestehender Schädigungen anzusiedeln und ab einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 160 kHz sind die faserdominierenden Schädigungsmechanismen einzuordnen. Der Grund dafür ist die stärkere Streuung der Schallwellenanteile mit hohen Frequenzen an den Inhomogenitäten im Werkstoffverbund. Zusätzlich sind die Schalllaufwege im Bauteil länger als bei den Couponproben, was dazu führt, dass am Bauteil kaum faserversagenstypische Frequenzen der Couponproben jenseits der 220 kHz detektiert werden können. Diese deutliche Trennung der Cluster bei den durchgeführten Belastungstests an CFK-Rädern mit

Schallemissionsmessungsbegleitung ermöglicht die reduzierte Betrachtung der gewichteten Vorzugsfrequenz zur Einordnung der verschiedenen Schädigungsmechanismen.

Des Weiteren ist sowohl bei den quasi-statischen Belastungstests als auch bei den umlaufenden Belastungen auf der Biegeumlaufprüfmaschine die Schadensentwicklung in den jeweiligen Hauptschädigungsbereichen durch die Ortung der Schallemissionssignale darstellbar. Dies bietet vor allem bei der Bauteilerprobung und mit dem Abgleich zu Simulationsergebnissen während der Entwicklungsphase enorme Vorteile gegenüber den bekannten, konventionellen zerstörungsfreien Prüfverfahren, da die Schädigungsbereiche und deren Entwicklung genau zu den eingetragenen Lasten zugeordnet werden können. Speziell bei den Untersuchungen an den CFK-Rädern können Schallemissionsereignisse im höheren Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz neu entstandenen Schädigungsmechanismen zugeordnet werden, wohingegen Schallemissionen im niederfrequenten Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz hauptsächlich Reibgeräusche bestehender Vorschädigungen sind. Die Schallemissionsrate und vor allem ein schlagartiger Anstieg derselben kann als Schädigungsindikator zur Bereichsklassifizierung von „gut tragenden“ und „schlecht tragenden“ Bereichen im Bauteil verwendet werden und korreliert mit dem Verlauf des Felicity-Ratios. Dieses Verhalten zeigt sich bevor beispielsweise über einen gemessenen Steifigkeitsabfall derselbe Effekt aufgezeigt wird und kann folglich als Kriterium für die Betriebsfestigkeit angewandt werden. Deshalb eignet sich die Schallemissionsanalyse als begleitendes zerstörungsfreies Prüfverfahren kombiniert mit der Steifigkeitsprüfung von CFK-Rädern im Niederlastbereich.

Es ist möglich, eine Aussage über den Bauteilzustand zu treffen, ohne dieses spezifische Bauteil jemals mit der Schallemissionsanalyse gemessen zu haben. Der Prüfablauf kann wie folgt sein:

- Steifigkeitsmessung begleitet mit Schallemissionsanalyse im Niederlastbereich (z.B. 3 kN – 6 kN) umlaufend.
- Vergleich der aktuellen Messergebnisse mit Messdaten, die nach schädigenden Lasten (z.B. BUP, ZWARP, quasistatische Druckversuche) an Rädern desselben Typs aufgenommen wurden (schallemissionsbasierter Schadenskatalog).
- Suche nach Anstieg bei der Schallemissionsrate, der Burstenergie und gewichteter Vorzugsfrequenz; Anstieg der genannten Schallemissionsparameter meist vor Steifigkeitsabfall im Bauteil messbar
- Anteil an Bursts mit hoher gewichteter Vorzugsfrequenz deuten auf lokale Bauteilschädigungen hin
- Lokalisierung und Zuordnung der Schallemissionsereignisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Schallemissionsanalyse als zerstörungsfreies Prüfverfahren für Bauteile aus faserverstärkten Kunststoffen geeignet ist. Darüber hinaus kann mit Schallemissionsparametern der Bauteilzustand und der Schädigungsgrad ermittelt werden. Grundlage hierfür ist ein bauteilspezifischer Schadenskatalog, der über zerstörende Tests ermittelt wurde. Im Idealfall erfolgt die Ermittlung des Schadenskataloges parallel zu einer anderen Prüfung, über die zusätzliche Informationen hinsichtlich des Bauteilzustandes gewonnen werden können. Dies ist nicht nur für CFK-Räder möglich, sondern auf beliebige Bauteile übertragbar. Vorrausetzung hierzu ist die dementsprechende Anpassung des Messequipments (ausreichende Anzahl an Sensoren), die reproduzierbare Positionierung der Sensoren, die Bestimmung der Schalllaufzeiten und ein repräsentatives Prüfregime, das den

Bauteilbelastungen im Realbetrieb sehr nahekommt. Dies ist vor allem bei der Bauteilerprobung und der damit verbundenen Betriebsfestigkeitsuntersuchung relevant.

Für die weitere Qualifizierung der Schallemissionsanalyse kann die Schadensentwicklung in unterschiedlichen Bereichen mit den Ergebnissen der Simulation bei der Bauteilauslegung verglichen werden. Dadurch kann abgesichert werden, ob der erwartete Schädigungseintrag auch gegebenenfalls beim Missuse der Bauteile und somit beim Versagen mit den realen Ergebnissen übereinstimmt. Darüber hinaus kann die Materialcharakterisierung, die durch Zug- und Biegeprüfungen durchgeführt wird, um die werkstoffspezifischen Schallemissionen erweitert werden. Dies würde weitere Optimierungspotentiale bei der Berechnung und Simulation der Bauteile während des Entwicklungsprozesses bieten, da die zuordenbaren Schäden genauen Lasteinträgen zugeordnet werden können.

Weiterführende Arbeiten zu diesem Thema können sich sowohl auf der Couponebene, als auch auf Bauteilebene mit der Automatisierung der Clustererkennung auseinandersetzen. Die in dieser Arbeit dargestellten Schädigungscluster an den unterschiedlichen Couponproben und Bauteilen wurden alle „händisch“ herausgearbeitet. Die zu entwickelnde Methode muss mit den Ergebnissen von Untersuchungen bei denen die Cluster noch „händisch“ erstellt wurden, entwickelt und validiert werden. Die automatisierte Clustererkennung lässt eine schnellere Erkennung der Schädigungscluster zu.

Literaturverzeichnis

[1] FRANKENSTEIN, B.; Schulze, E., Fischer, D., Weihnacht, B (Mitarb.): *Rotorblattüberwachungssystem für Windkraftanlagen basierend auf Schallemissionstechnik*. Graz, 2012 (Dach-Jahrestagung)

[2] ASSMANN, W.; WITTEN, E. (Mitarb.): *Handbuch Faserverbundkunststoffe - Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4. Aufl.* Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2013

[3] SCHÜRMANN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* : *Mit 39 Tabellen*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, NY : Springer, 2007 (VDI)

[4] ASKELAND, Donald R.; FULAY, P. P. (Mitarb.): *Essentials of materials science and engineering*. 2. ed., SI. Stamford Conn. : Cengage Learning, 2010

[5] RÖSLER, Joachim ; HARDERS, Harald ; BÄKER, Martin: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. 4., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2012

[6] ASKELAND, Donald R.; FULAY, P. P. (Mitarb.); WRIGHT, W. J. (Mitarb.) : *The science and engineering of materials. 6. ed.* Stamford : SI, 2011

[7] PUCK, Alfred: *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten* : *Modelle für die Praxis*. München, Wien : Hanser, 1996

[8] SCHUBERT, Lars: *Zustandsüberwachung an Faserverbundwerkstoffen mit geführten Wellen*. Dresden, TUDpress. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2011. 2012

[9] HEUTLING, Falko: *Mikrofraktographie an CFK-Werkstoffen als Instrument zur Charakterisierung von Materialeigenschaften und zur Interpretation von Versagensphänomenen*. Zugl.: Diss. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2000 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5, Grund- und Werkstoffe, Kunststoffe 581)

[10] SCHMITT-THOMAS, Karlheinz G.: *Integrierte Schadenanalyse* : *Technikgestaltung und das System des Versagens*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2005 (VDI)

[11] SCHOßIG, M.: *Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen* : *Dissertation*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg-Teubner, 2011

[12] SAUSE, Markus: *Identification of failure mechanisms in hybrid materials utilizing pattern recognition techniques applied to acoustic emission signals*. Berlin, mbv, Mensch-und-Buch-Verl. Zugl.: Augsburg, Univ., Diss., 2010. 2010

[13] KRIEGER, Hanno: *Strahlungsquellen für Technik und Medizin*. 1. Aufl. Wiesbaden : Teubner, 2005

[14] LEHNERTZ, K.: *Medizinische Physik: Physikalische Grundlagen der medizinischen Bildgebung: Erzeugung von Röntgenstrahlen*. 2016

[15] HANKE, R.: *Computertomographie in der Materialprüfung Stand der Technik und aktuelle Entwicklung*. Erfurt, 2010

[16] HASSLER, U.; Mohr, S. und Müller, A. (Mitarb.): *Computertomographie zur Analyse von Faserverbundwerkstoffen*. Berlin : Springer, 2010

[17] MAISL, M.; SCHORR, C. (Mitarb.); PORSCH, F. (Mitarb.) : *Computerlaminographie, Grundlagen und technische Umsetzung*. Fürth, 2010

[18] EISENBLÄTTER, J.: *Einführung in die Schallemission*. Dresden, Dresden International University. Vorlesungsunterlagen. 2012

[19] VALLEN, Hartmut: *Die Schallemissionsprüfung*. Wuppertal : Castell-Verl., 2003 (ZfP - kompakt und verständlich 6)

[20] HÖNIG, U.: *Erstellung eines Anforderungsprofils an Referenzversuche zur Ermittlung und Bewertung von unterschiedlichen Schadensmechanismen in Faserverbunden mittels Schallemissionsanalyse, Diplomarbeit*. Diplomarbeit. Freiberg, 2016

[21] SCHNEIDER, G.: *atgndt.com*

[22] PROSSER, W. H.: *Advanced AE Techniques in Composite Materials Research*. 1996

[23] ROWLAND, C.: *Acoustic emission technique to assist the formula one designer in structural design*. Berlin, 2004

[24] MABRY, N.; BANKS, C. (Mitarb.): *Acoustic Emission Felicity Ratio Measurements in Carbon Composites Laminates using Fiber Bragg Grating Sensors* : *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2011

[25] BOHSE, J.; CHEN, J. (Mitarb.): *Acoustic emission examination of Mode I, Mode II and mixedmode I/II interlaminar fracture of unidirectional fiber reinforced polymers* : Encino CA, 2001

[26] BOHSE, J.: *Schallemission von verstärkten Polymeren, 14. Kolloquium Schallemission*. Berlin, 2003

[27] GROOT, P. J. de; Wijnen, P. A. M., Janssen, R. B. F. (Mitarb.): *Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites, Composites Science and Technology Vol. 55*. 1995

[28] NI, Q.-Q.; IWAMOTO, M. (Mitarb.): *Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model comosites, Engineering Fracture Mechanics Vol. 69*. Pahang, 2002

[29] EATON, M.; HOLFORD, K. (Mitarb.); FEATHERSTON, C. (Mitarb.); PULLIN, R. (Mitarb.) : *Damage in carbon fibre composites: The discrimination of acoustic signals using frequency*. 2007

[30] ATIVITAVAS, N.: *Acoustic emission signature analysis of failure mechanisms in fibre reinforced plastic structures*. Dissertation. Austin, 2002

[31] HUFENBACH, W.; Richter, H., Protz, R., Langkamp, A., Böhm, R., Ritschel, T. (Mitarb.): *Schädigungsanalyse an textilverstärkte Verbundwerkstoffen auf Basis aktiver und passiver akustischer ZfP-Verfahren*. Fürth, 2007

[32] SAUSE, M. G. R.; HORN, S. (Mitarb.): *Influence of Specimen Geometry on Acoustic Emission Signals in Fiber Reinforced Composites: FEM-Simulations and Experiments*. Wien, 2010

[33] EATON, M.; MAY, M. (Mitarb.); FEATHERSTON, C. (Mitarb.); HOLFORD, K. (Mitarb.); HALLET, S. (Mitarb.); PULLIN, R. (Mitarb.) : *Characterisation of Damage in Composite Structures using Acoustic Emission*. 2011

[34] SAUSE, M. G. R.; HORN, S. (Mitarb.): *Einfluss der Signallaufzeit auf die Unterscheidbarkeit von Schallemissionsquellen in Faserverbundwerkstoffen*. Wetzlar, 2011

[35] RICHLER, Stefan: *Gezielte Erzeugung mikroskopischer Schädigungsarten von Faserverbundwerkstoffen in Kombination mit Schallemissionsanalyse*. Augsburg, Universität Augsburg. Dissertation. 2016

[36] RADLMEIER, M.; JAHNKE, P. (Mitarb.): *Failure mechanisms of carbon-fiber-reinforced polymer materials characterized by acoustic emission techniques*. Granada, 2012

[37] SAUSE, M. G. R.; Schultheiß, D., Horn, S. (Mitarb.): *Acoustic emission investigation of coating fracture and delamination in hybrid carbon fiber reinforced plastic structures*. 2008

[38] KÖPPEL, Stefan: *Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken*. Zürich, Singen, 2002 (Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich)

[39] MÖSER, Michael ; KROPP, Wolfgang: *Körperschall* : *Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. 3., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010

[40] GROßE, Christian Ulrich (Hrsg.); OHTSU, Masayasu (Hrsg.): *Acoustic emission testing* : *[basics for research - applications in civil engineering]*. Berlin : Springer, 2008

[41] GIURGIUTIU, Victor: *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors*. 2nd ed. Oxford, UK : Academic Press, 2008

[42] JANSCHEK, Klaus: *Systementwurf mechatronischer Systeme* : *Methoden, Modelle, Konzepte*. Berlin u.a. : Springer, 2010

[43] GROSSE, C.: *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse undUltraschall* : *Dissertation*. 02 FAKULTÄT BAU- UND UMWELTINGENIEURWISSENSCHAFTEN UNIVERSITÄT STUTTGART (Hrsg.). Stuttgart, 1996

[44] KURZ, J. H.; Grosse, C. U., Reinhardt, H.-W. (Mitarb.): *Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete*. 2004

[45] SCHREIBER, C.: *Schallemissionsmessung und dem Fortschritt realer Schädigungsmechanismen in kohlenstofffaserverstärkten Couponproben, Masterarbeit* : *Masterarbeit*. Freiberg, 2017

[46] SCHECHINGER, B.: *Schallemissionsanalyse zur Überwachungder Schädigung von Stahlbeton*. Zürich : vdf Hochschulvlg; Auflage: 1

[47] HÖNIG, U.; Holder, U., Pietzsch, A., Schulze, E., Frankenstein, B., Schubert, L. (Mitarb.): *Definition of requirements for reference experiments to determine and evaluate various damage mechanisms in fibre composites by acoustic emission*. München, 2016

[48] HOLDER, U.; Schreiber, C., Schubert, L., Schulze, E. (Mitarb.): *Zuordnung von Schallemissionsparametern zu spezifischen Schadensarten in CFK-Werkstoffen*. Fulda, 2017

[49] *DIN EN ISO 527 Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften*

[50] 2011. *DIN EN ISO 14125 Faserverstärkte Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften*

[51] GUZ, A. N.: *Elastic Waves in Bodies with Initial (Residual) Stresses*. Vol. 38. Berlin, 2002

[52] GONZALEZ, Rafael C. ; WOODS, Richard E.: *Digital image processing*. 3. ed., internat. ed. Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2008

[53] PAG; HOLDER, U. (Mitarb.): *Methodenentwicklungsanträge, KVAT-Anträge, KVAT-Berichte, Projektstatusberichte Werktofftechnik Vorentwicklung und Technologiemanagement. Weissach, 2015 - 2017, Bildquelle IAMT GmbH*

[54] BRANDMAYR F.; ROBERT T., Helmut R. (Mitarb.): *Hochbeanspruchte CFK-Torsionsrohre in verschiedenen Fertigungsverfahren -Test und Versagensformen*. Augsburg, 2015

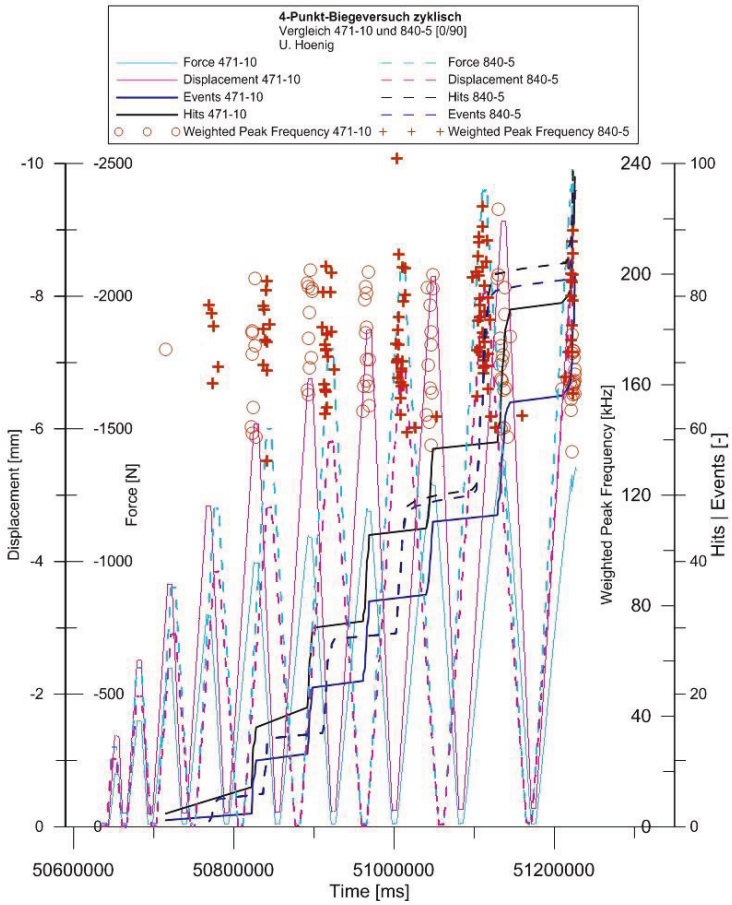
[55] PAG; HOLDER, U. (Mitarb.): *Einzeldarstellung WPF BT33*. Weissach, 2016

Abbildungsverzeichnis

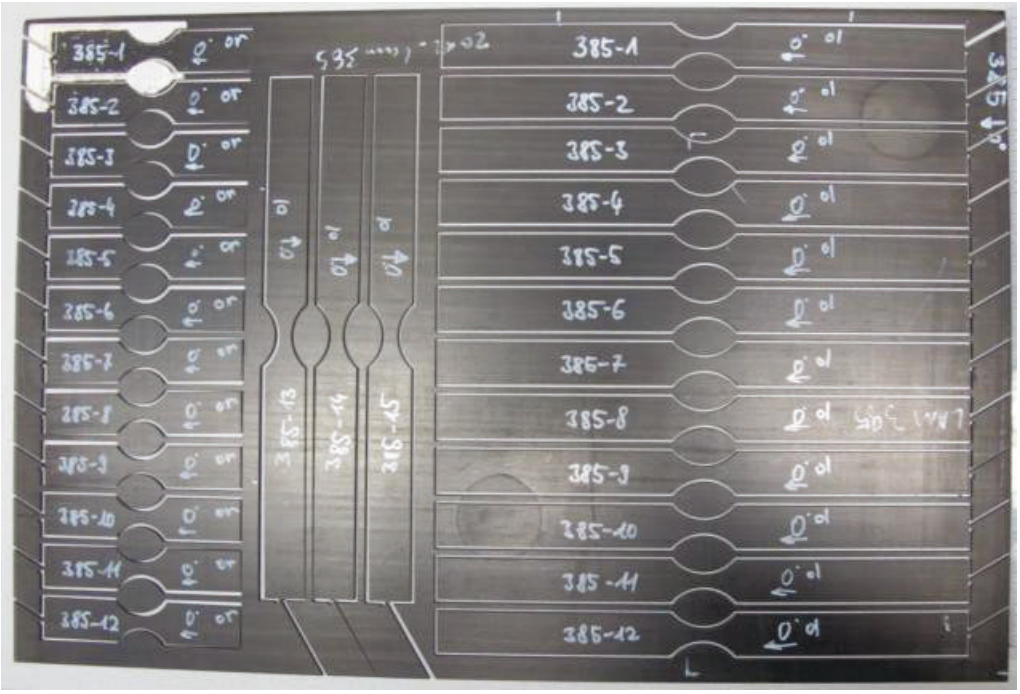
Tabellenverzeichnis

Formelverzeichnis

Anhang



Anhang Abbildung 1 Vergleich akustisches und mechanisches Verhalten der Laminate 471 und 840 über Proof-Loads



Anhang Abbildung 2 Probenplatte mit wasserstrahlgeschnittenen taillierten Proben

Laminat	Eigenschaft	Versuchsart	Zweck der Prüfung
840 $[0/90]_{12}$ **841** $[\pm45]_{12}$ **842** $[QI]_{12}$	Gewebe, hohe Zugfestigkeit, "spröde"	Zz, Bz, Bk	Entwicklung Versuchsaufbau und Versuchskonfiguration
868 $[\pm45]_8$ **869** $[0/90]_8$ **842** $[QI]_8$	Gewebe, Geringe Zugfestigkeit "duktil"	Bk	Entwickling Versuchskonfiguration
471 $[0/90]_8$ **472** $[\pm45]_8$ **473** $[QI]_8$	Gewebe, hohe Zugfestigkeit (T700), 12k, "spröde"	Zk, Zz, Bk, Bz	Vergleich konventionelle und zyklische Versuchsdurchführung AE-Aktivität bei hoher E-Modul-Matrix
87 $[0/90]_8$ **88** $[\pm45]_8$ **89** $[QI]_8$	Gewebe, hohe Dicke (3mm), "spröde“	Bz	AE-Aktivität bei hoher Materialdicke
522 $[0/90]_8$ **523** $[QI]_8$ **524** $[\pm45]_8$	Gewebe, geringe Zugfestigkeit, geringe Dicke (1mm)	Zk, Zz, Bk, Bz	AE-Aktivitäten bei niedriger E-Modul-Matrix AE-Signalverhalten bei geringer Materialdicke
894 $[90]_3$ **895** $[0]_3$	UD-Schlauch	Zz, Bz	AE-Verhalten bei selber Faser-Matrixkombinatio
900 $[90]_3$ **901** $[0]_3$	UD-Gewebe	Zz, Bz	AE-Verhalten bei selber Faser-Matrixkombinatio
903 $[\pm45/0]_6$	UD-Gewebe/Biaxial-Gelege	Zz, Bz	AE-Verhalten bei selber Faser-Matrixkombinatio
906 $[0/90, \pm45]_6$ **907** $[\pm45, \pm45]_6$	Biaxial-Gelege	Zz, Bz	AE-Verhalten bei selber Faser-Matrixkombinatio

Zz - Zugversuch zyklisch; Zk - Zugversuch konventionell;

Bz - 4-Punkt-Biegeversuch zyklisch; Bk - 4-Punkt-Biegeversuch konventionell

Anhang Tabelle 1 Übersicht der Materialien und deren Verwendungszweck

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
384 - 1	1	48	36,1	Tastprobe, durchgefahren
384 - 2		54	23,9	Abbruch nach 15 Ereignissen
384 - 3		60	15,6	Abbruch nach 15 Ereignissen
384 - 4			20,9	Abbruch nach 1 Ereignis
384 - 5			12,7	Abbruch
384 - 6			14,3	Abbruch nach 14 Ereignissen
384 - 7			36,1	durchgefahren
384 - 8			23,1	Abbruch
384 - 9			33,4	Abbruch nach 2 Ereignissen
384 - 10			11,7	Abbruch nach 3 Ereignissen
384 - 11			19,9	Abbruch
384 - 12			40,0	durchgefahren

Anhang Tabelle 2 4-Punkt-Biegeversuche Laminat 384 [90]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
390 - 1	1	60	23,8	durchgefahren, keine Ereignisse
390 - 2	1		24,2	Versagen = 1 Ereignis
390 - 3	0,75		6,5	Abbruch nach 30 Ereignissen
390 - 4	0,75		20,4	durchgefahren
390 - 5	0,5		24,7	Abbruch nach 1 Ereignis
390 - 6			12,5	Abbruch nach 30 Ereignissen
390 - 7			14,7	Abbruch nach 3 E., danach Versagen
390 - 8			15,4	Abbruch nach 2 Ereignissen
390 - 9			7,4	Abbruch nach 1 Ereignis
390 - 10			11,4	Abbruch nach 1 Ereignis
390 - 11			6,2	Abbruch nach 41 Ereignissen
390 - 12			25,1	Abbruch nach 30 Ereignissen

Anhang Tabelle 3 4-Punkt-Biegeversuche Laminat 390 [90]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
385 - 1	1	54	658	Abbruch nach 768 Ereignissen
385 - 2		48	633	Abbruch nach hoher Amplitude
385 - 3		42	597	Abbruch nach 7 Ereignissen
385 - 4			590	Abbruch nach 1 Ereignis
385 - 5			506	Abbruch nach hoher Amplitude
385 - 6			503	Abbruch nach 6 Ereignissen
385 - 7			506	Abbruch nach 2 Ereignissen
385 - 8			505	Abbruch nach 11 Ereignissen
385 - 9			503	Abbruch nach 1 Ereignis
385 - 10			565	Abbruch nach 1 Ereignis
385 - 11			600	Abbruch nach 4 Ereignissen
385 - 12			489	Abbruch nach 1 Ereignis

Anhang Tabelle 4 4-Punkt-Biegeversuche Laminat 385 [0]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
389 - 1	1	54	565	durchgefahren
389 - 2		48	460	Probenversagen
389 - 3		48	453	Probenversagen
389 - 4		48	475	Abbruch nach 9 Ereignissen
389 - 5		42	445	Abbruch nach 4 Ereignissen
389 - 6		42	462	Abbruch nach 1 Ereignis
389 - 7		42	457	Abbruch nach 1 Ereignis
389 - 8		42	461	Abbruch nach 4 Ereignissen
389 - 9		42	486	Abbruch nach 4 Ereignissen
389 - 10		42	473	Abbruch nach 1 Ereignis
389 - 11		48	466	Abbruch nach 8 Ereignissen

Anhang Tabelle 5 4-Punkt-Biegeversuche Laminat 389 [0]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
390 - 1	1	42	886	durchgefahren
390 - 2	0,5		920	durchgefahren
390- 3			193	Abbruch nach 10 Ereignissen
390 - 4			767	Abbruch nach 3 Ereignissen
390 - 5			417	Abbruch nach 9 Ereignissen
390 - 6			182	Abbruch nach 22 Ereignissen
390 - 7			990	Abbruch nach 3 Ereignissen
390 - 8		60	1030	Versagen = Ereignis
390- 9	0,25		837	Abbruch nach 3 Ereignissen
390 - 10			1040	Probenversagen
390 - 11			959	Probenversagen
390 - 12			940	Abbruch nach 1 Ereignis
389 - 13			794	Abbruch nach 5 Ereignissen
389 - 14			927	Abbruch nach 5 Ereignissen
389 - 15			629	Abbruch nach 3 Ereignissen

Anhang Tabelle 6 Zugversuche Laminat 390 Probe 1-12 [90] und 389 Probe 13-15 [90]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
389 - 1	0,25	60	8490	durchgefahren
389 - 2	0,25	54	8250	durchgefahren
389- 3	0,25; ab 8000N 0,15	42	8230	durchgefahren
389 - 4		48	8580	durchgefahren
389 - 5		54	8070	Probenversagen
389 - 6		54	8160	Probenversagen
389 - 7	0,25;		8000	Abbruch nach 3 Ereignissen
389 - 8	ab 8000N 0,1		8110	Versagen = Ereignis
389- 9			8070	Probenversagen
389 - 10			7860	Probenversagen
389 - 11		60	7580	Probenversagen
389 - 12			7550	Probenversagen
390 - 13	0,25;		7630	Probenversagen
390 - 14	ab 7400 N 0,01		7480	Probenversagen
390 - 15			7650	Abbruch bei 7620N

Anhang Tabelle 7 Zugversuche Laminat 389 Probe 1-12 [0] und 390 Probe 13-15 [0]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
385 - 1	0,2	60	10200	durchgefahren
385 - 2	0,4		9230	durchgefahren
385- 3	0,4; ab 8500N 0,05		9200	Abbruch nach hoher Amplitude, danach Probenversagen
385 - 4			9270	Probenversagen
385 - 5			8840	Probenversagen
385 - 6			9220	bis 9220N gefahren
385 - 7			9070	Probenversagen
385 - 8			9250	Abbruch nach 46 Ereignissen
385- 9			9200	Probenversagen nach Abbruch
385 - 10			9270	bis 9270N gefahren
385 - 11			9270	Probenversagen nach Abbruch
385 - 12			8500	Probenversagen
384 - 13			9220	Probenversagen nach Abbruch
384 - 14			9270	bis 9270N gefahren
384 - 15			8670	Probenversagen

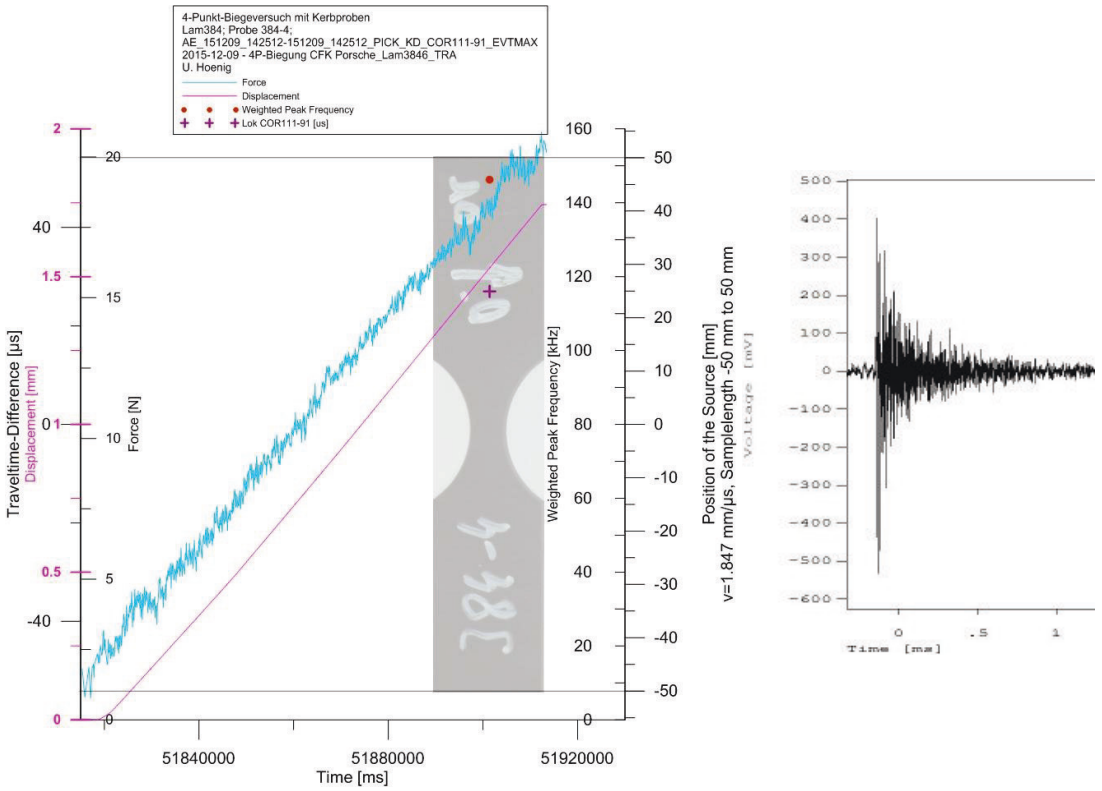
Anhang Tabelle 8 Zugversuche Laminat 385 Probe 1-12 [0] und 384 Probe 13-15 [0]

Probe	Geschwindigkeit [mm/min]	Verstärkung [dB]	Kraft [N]	Bemerkung
384 - 1	0,2	60	1000	durchgefahren
384 - 2			205	Abbruch nach 30 Ereignissen
384 - 3			425	Abbruch nach 75 Ereignissen
384 - 4			878	Abbruch nach 2 Ereignissen
384 - 5			235	Abbruch nach 30 Ereignissen
384 - 6			916	Abbruch bei 900N
385 - 13			443	Abbruch nach 28 Ereignissen
385 - 14			894	Abbruch nach 2 Ereignissen
385 - 15			481	Abbruch nach 47 Ereignissen

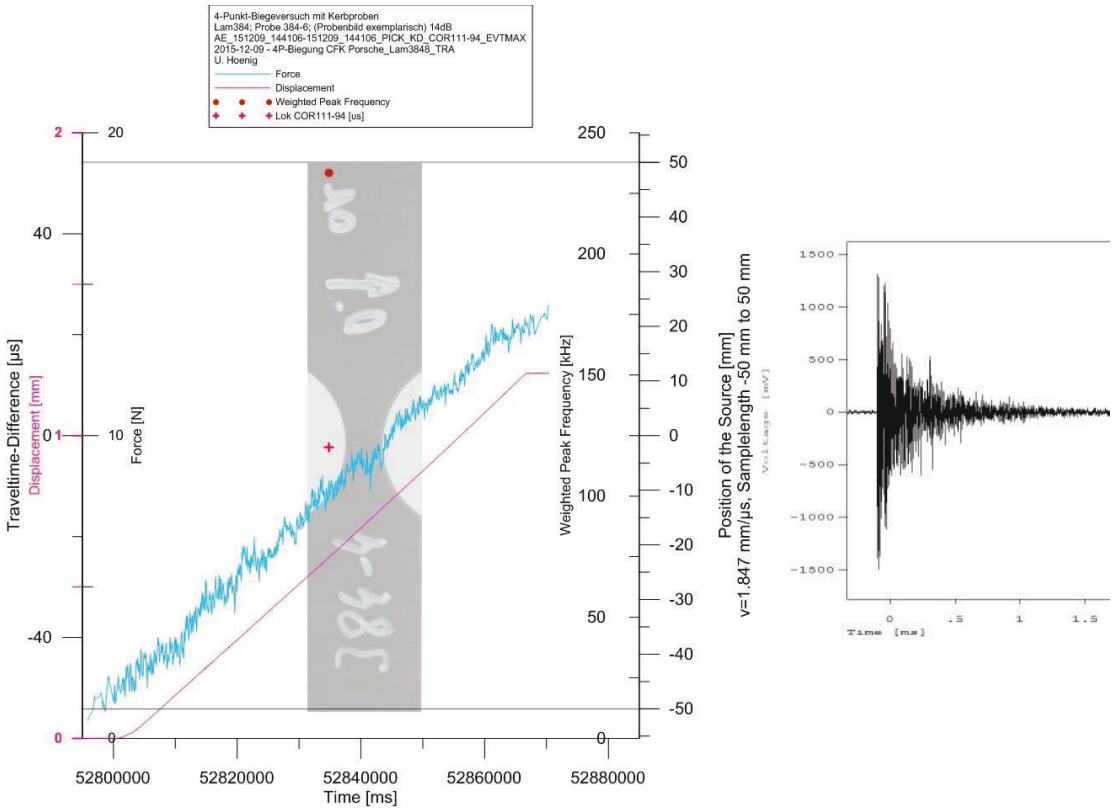
Anhang Tabelle 9 Zugversuche Laminat 384 Probe 1-12 [90] und 385 Probe 13-15 [90]

Laminatnr.	Laminataufbau	Maße [mm]	Schallgeschwindigkeit [m/s]
840	$[0/90]_{12}$; 12k	100x25x2,8	4381
		250x25 x2,8	7799
841	$[\pm45]_{12}$; 12k	100x25 x2,8	2759
		250x25 x2,8	4965
842	$[QI]_{12}$; 12k	100x25 x2,8	3456
		250x25 x2,8	6181
868	$[\pm45]_8$; 3k	100x25x2,1	2382
869	$[0/90]_8$; 3k	100x25x2,1	4146
870	$[QI]_8$; 3k	100x25x2,1	2789
471	$[0/90]_8$; 12k	100x25x2,5	4585
		250x25 x2,5	5561
472	$[\pm45]_8$; 12k	100x25 x2,5	2850
		250x25 x2,5	3032
473	$[QI]_8$; 12k	100x25 x2,5	4542
		250x25 x2,5	4944
522	$[0/90]_4$; 3k	100x25x1	4828
		250x25x1	5537
523	$[QI]_4$; 3k	100x25x1	3459
		250x25x1	4533
524	$[\pm45]_4$; 3k	100x25x1	2865
		250x25x1	3242
87	$[0/90]_8$; 12k	100x25x3	5898
88	$[\pm45]_8$; 12k	100x25x3	3211
89	$[QI]_8$; 12k	100x25x3	4914
894	$[90]_3$; 24k	100x25x2,1	2133
		250x25x2,1	2138
895	$[0]_3$; 24k	100x25x2,1	6017
		250x25x2,1	8272
900	$[90]_3$; 24k	100x25x1,8	2182
		250x25x1,8	2168
901	$[0]_3$; 24k	100x25x1,8	8264
		250x25x1,8	8802
903	$[\pm45,0]_s$; 24k	100x25x2,4	5034
		250x25x2,4	5840
906	$[0/90, \pm45]_s$; 24k	100x25x2,4	4722
		250x25x2,4	4890
907	$[\pm45, \pm45]_s$; 24k	100x25x2,4	3649
		250x25x2,4	3134
384 (mit Kerb)	$[90]_3$	100x20x2,1	1847
		250x20x2,1	2224
385 (mit Kerb)	$[0]_3$	100x20x2,1	4398
		250x20x2,1	11728
389 (mit Kerb)	$[0]_3$	100x20x2,1	5416
		250x20x2,1	9427
390 (mit Kerb)	$[90]_3$	100x20x2,1	1950
		250x20x2,1	2090

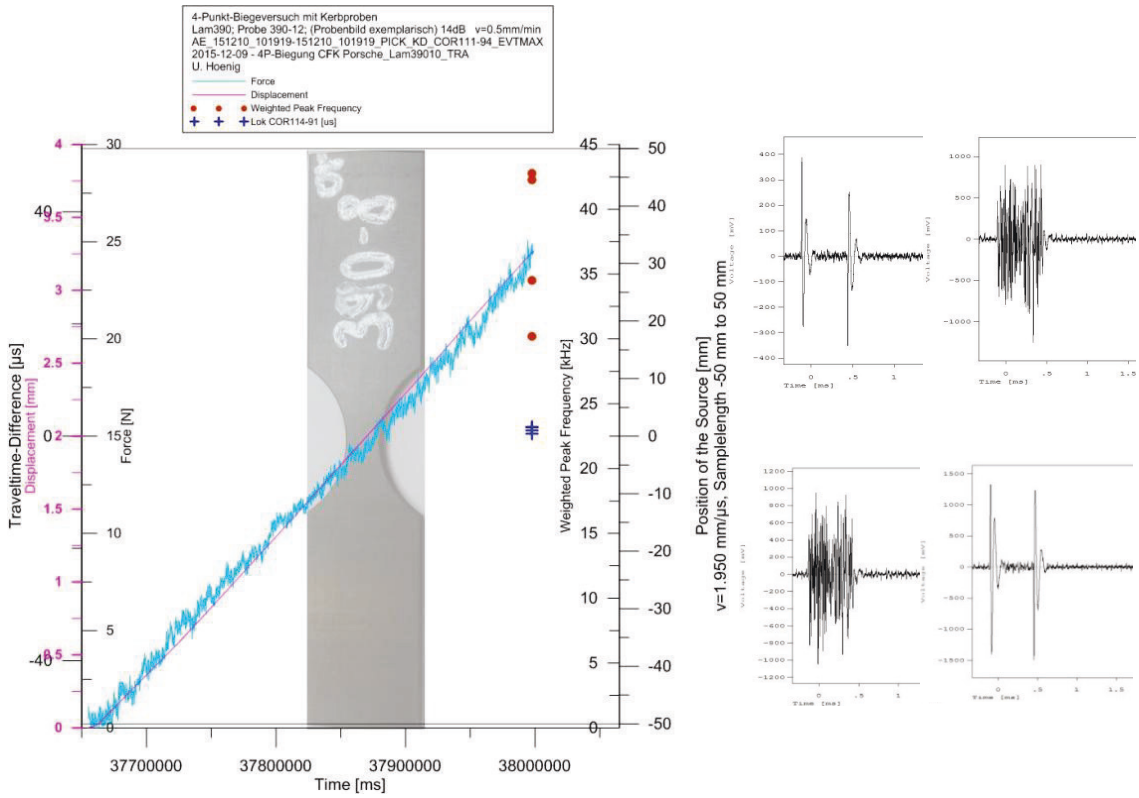
Anhang Tabelle 10 Übersicht der ermittelten Schallgeschwindigkeiten der getesteten Laminate der Vorversuche



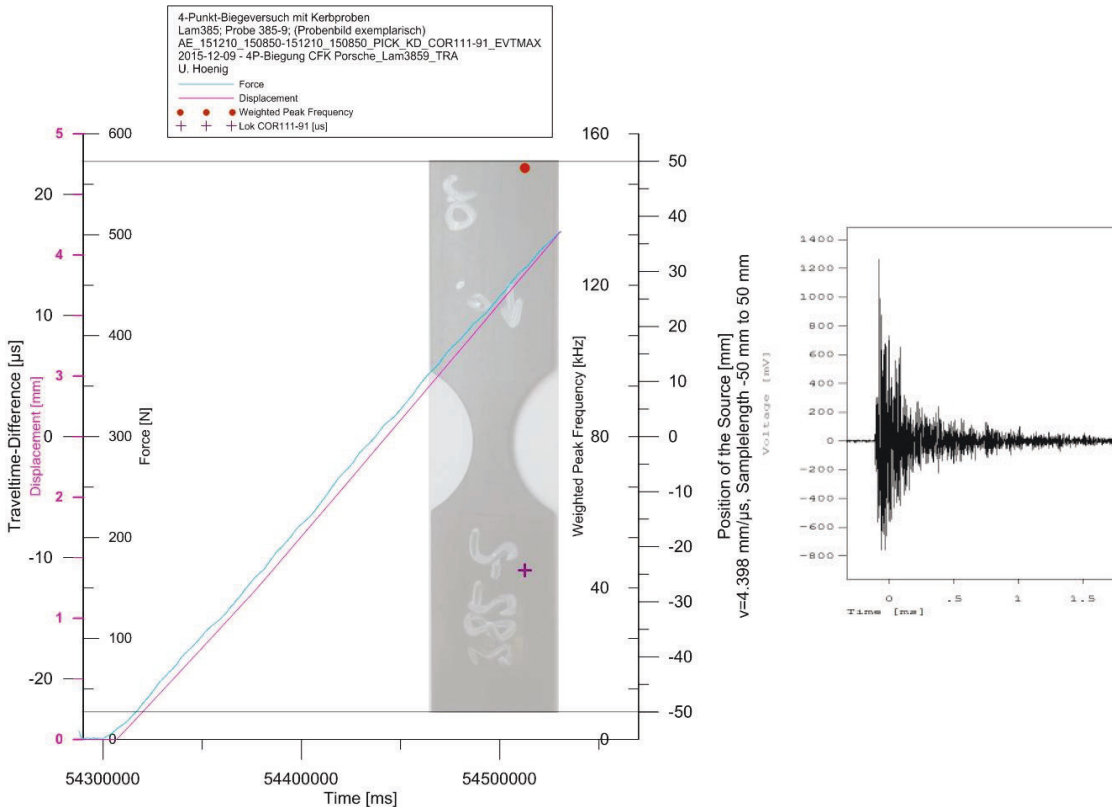
Anhang Abbildung 3 Biegeprobe 385-4 Schallemissionssignalverhalten (links) und transientes Signal



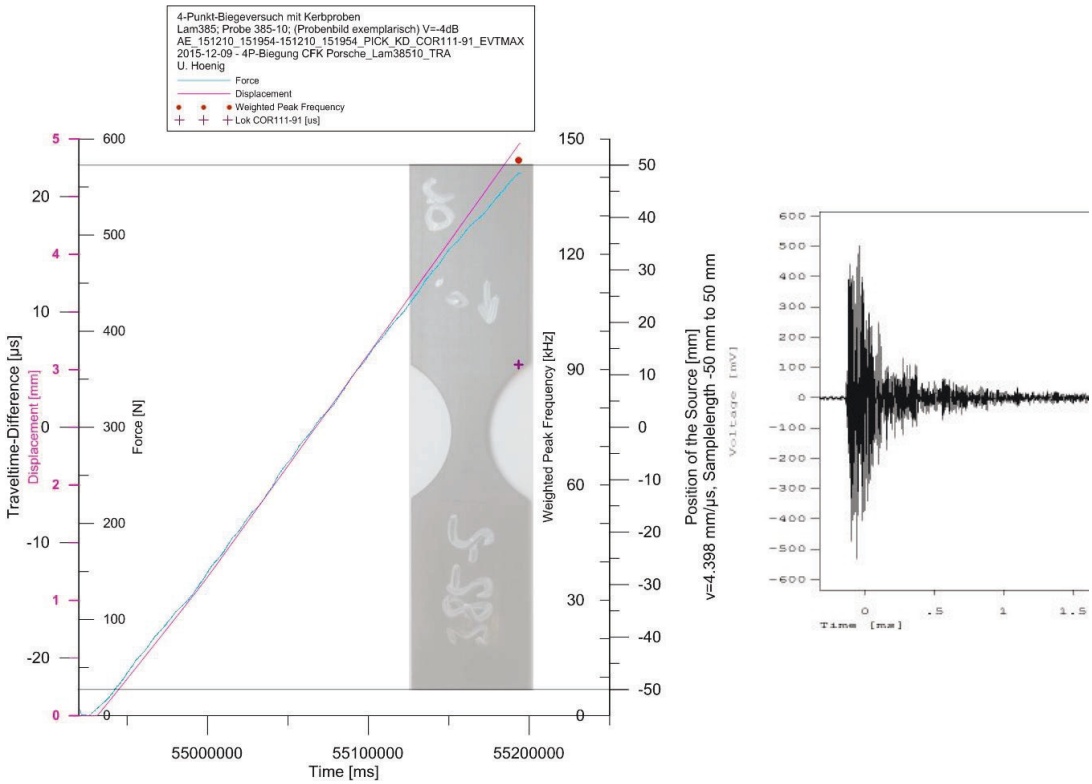
Anhang Abbildung 4 Biegeprobe 384-6 Schallemissionssignalverhalten (links) und transientes Signal



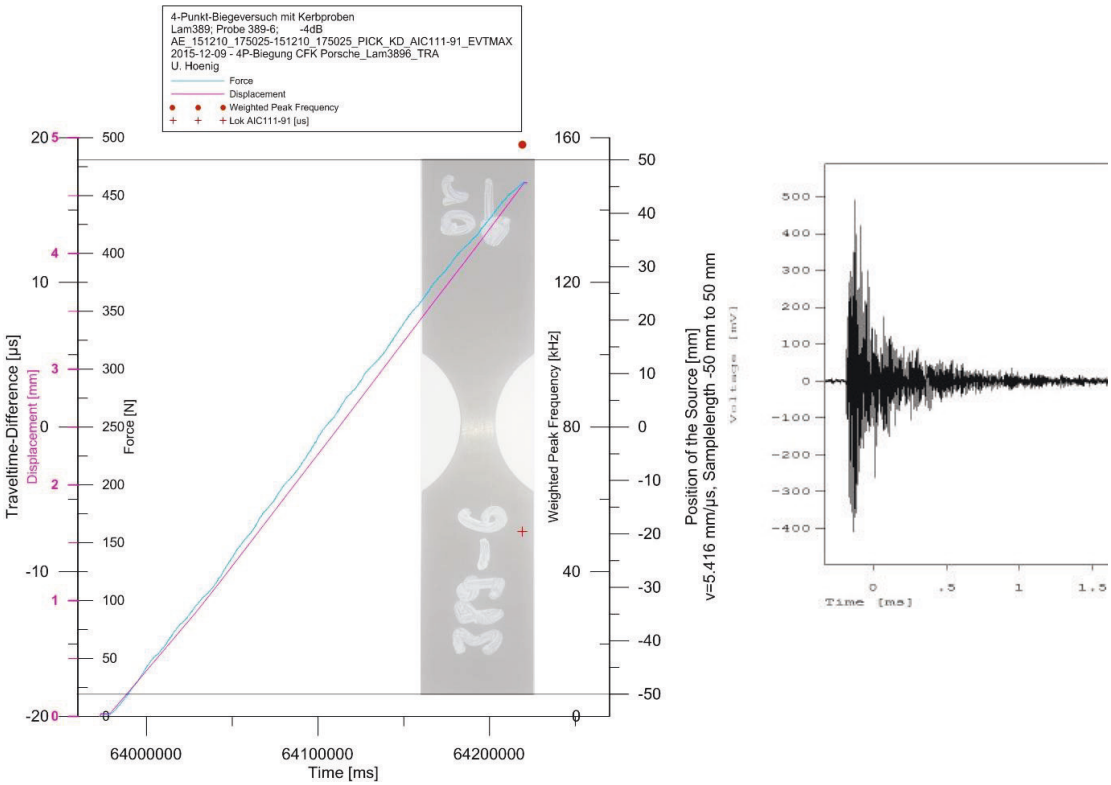
Anhang Abbildung 5 Biegeprobe 390-12 Schallemissionssignalverhalten Signale (elektrische Störung)



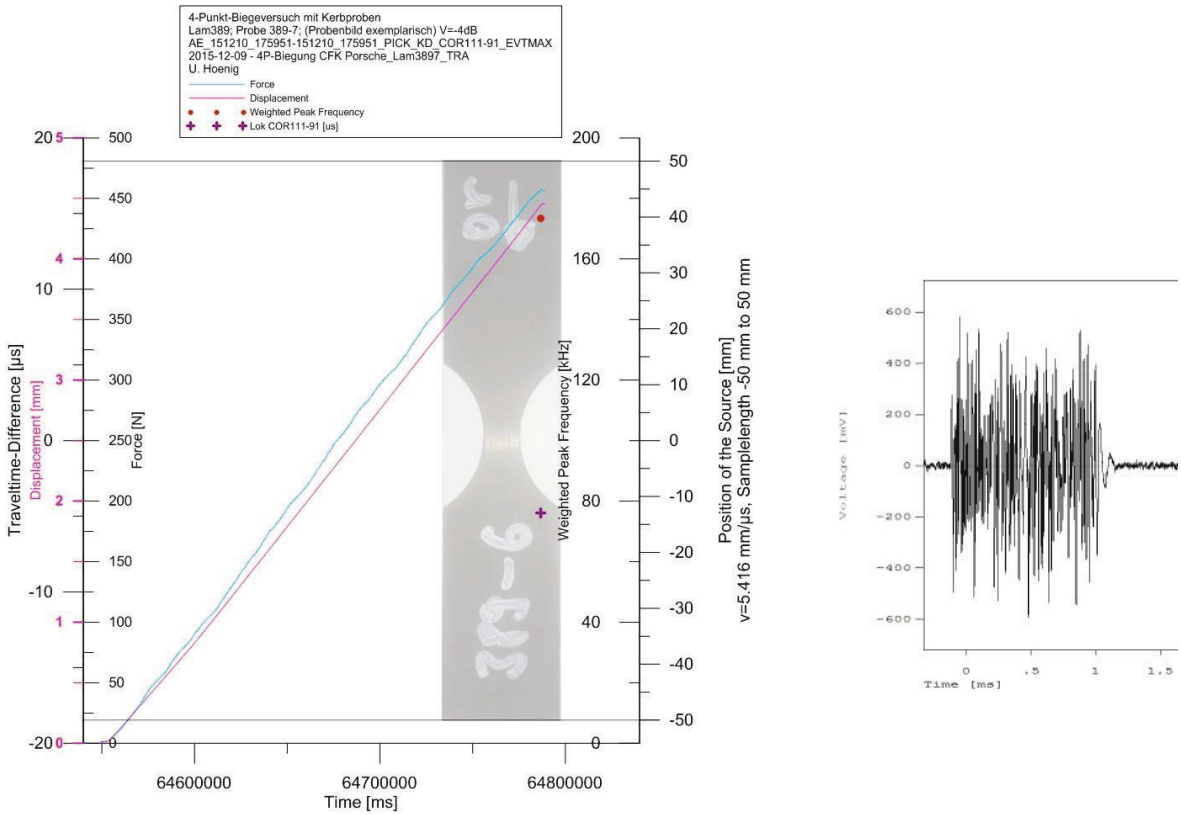
Anhang Abbildung 6 Biegeprobe 385-9 Schallemissionssignalverhalten (links) und transientes Signal



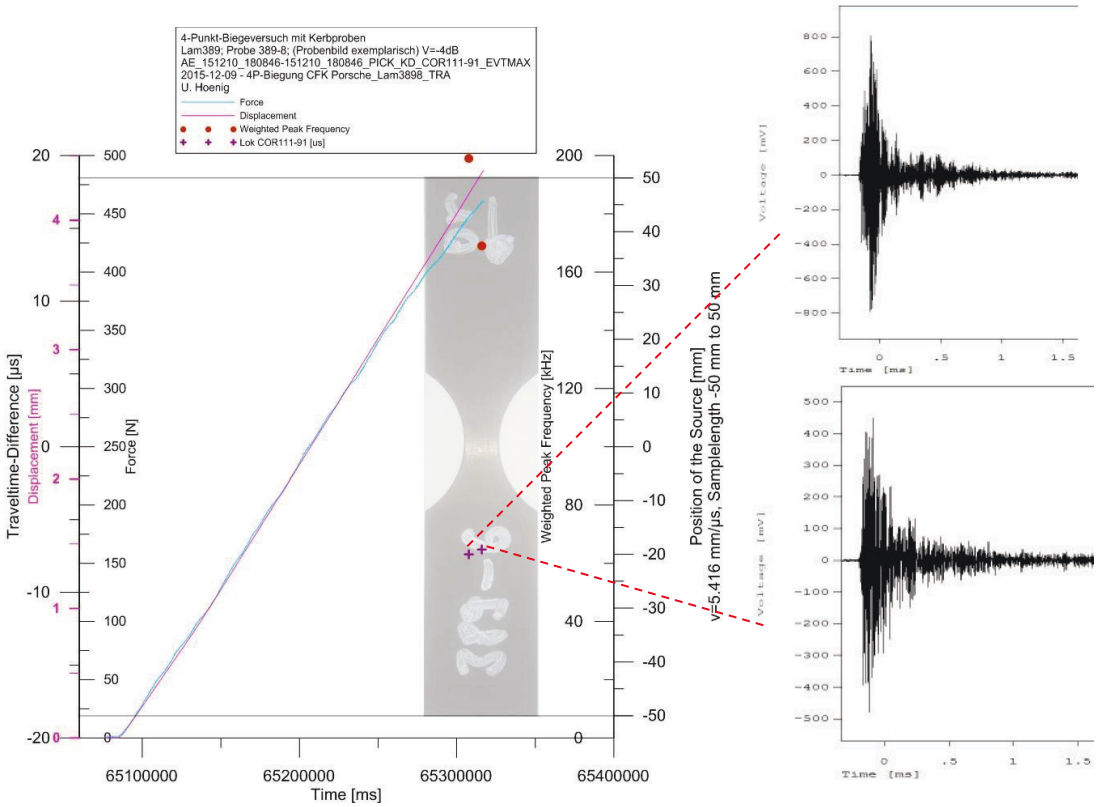
Anhang Abbildung 7 Biegeprobe 385-10 AE- Schallemissionssignalverhalten (links) und transientes Signal



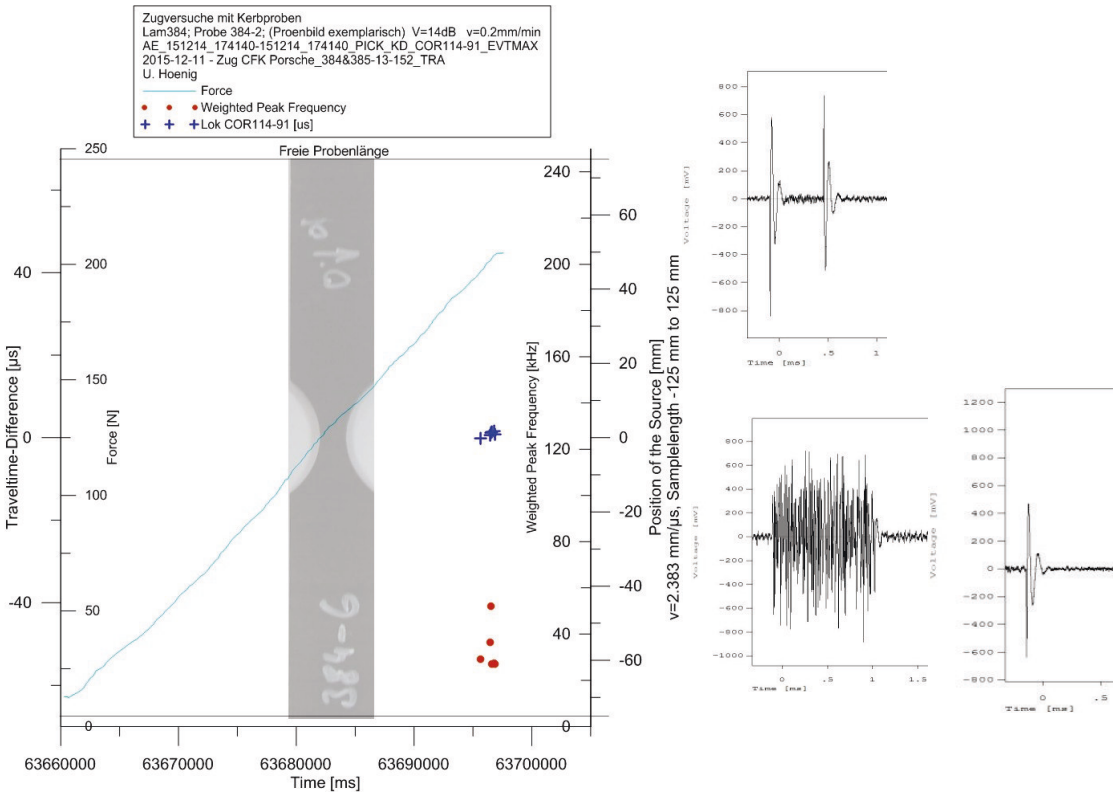
Anhang Abbildung 8 Biegeprobe 389-6 Schallemissionssignalverhalten (links) und transientes Signal des Events



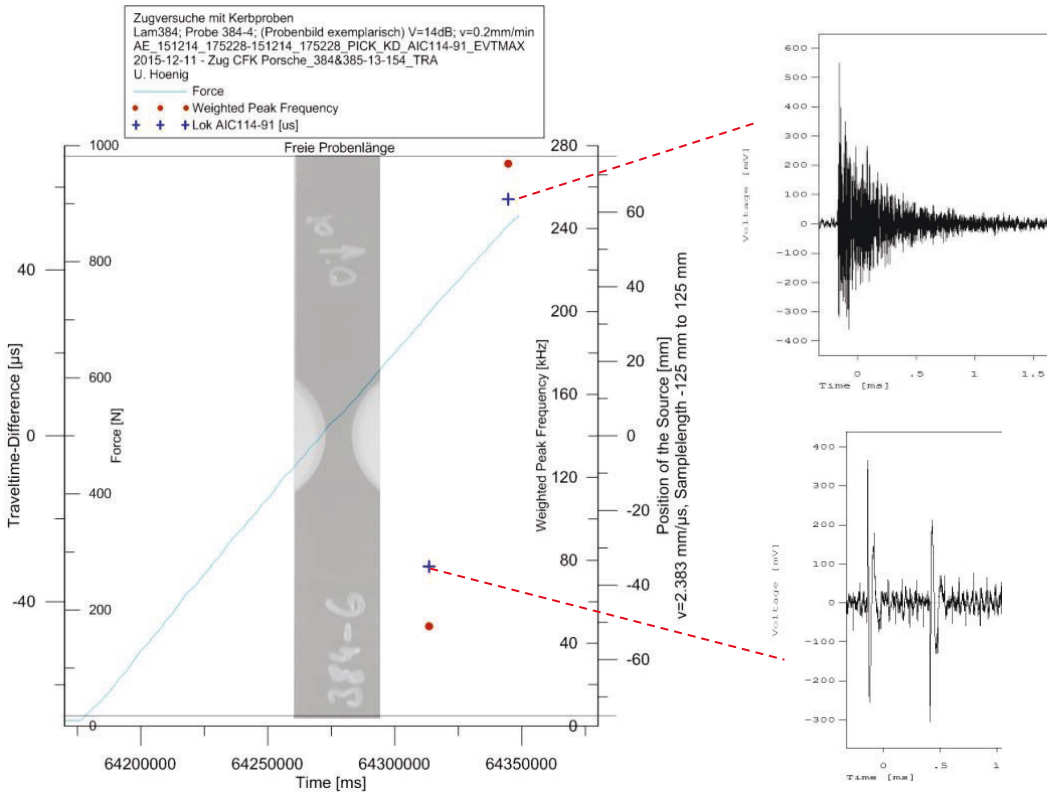
Anhang Abbildung 9 Biegeprobe 389-7 Schallemissionssignalverhalten (links) und transientes Signal



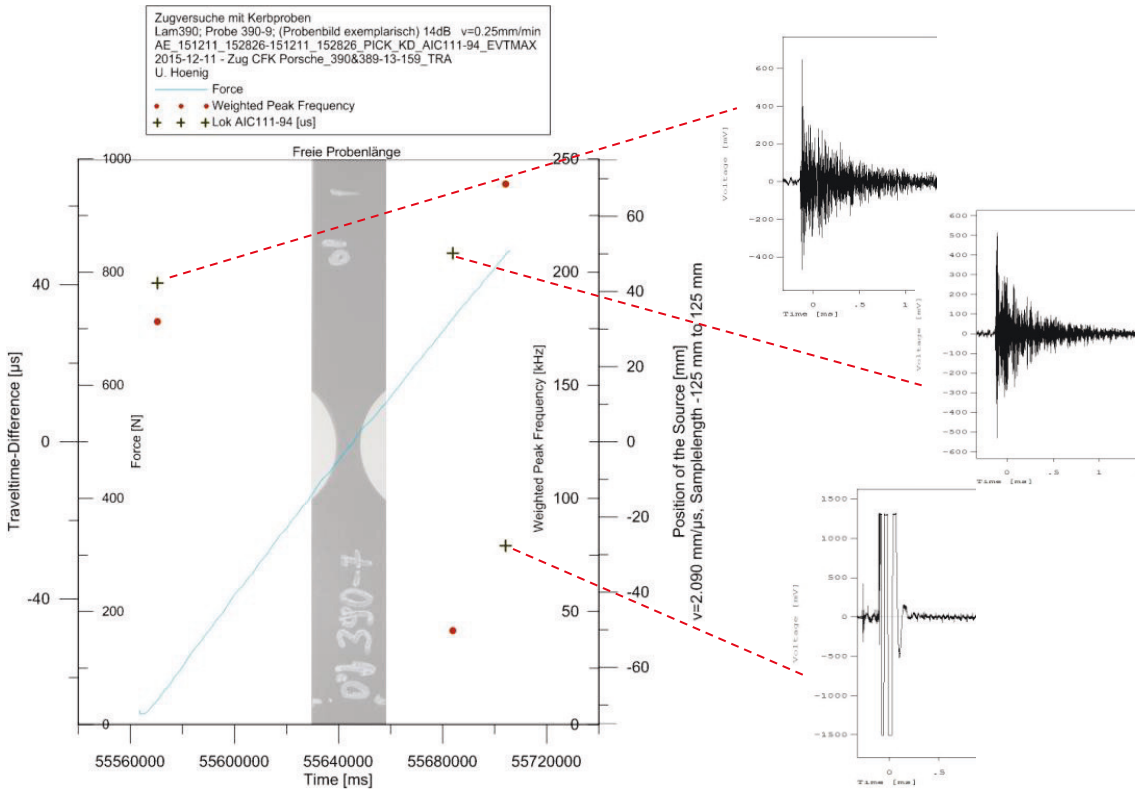
Anhang Abbildung 10 Biegeprobe 389-8 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



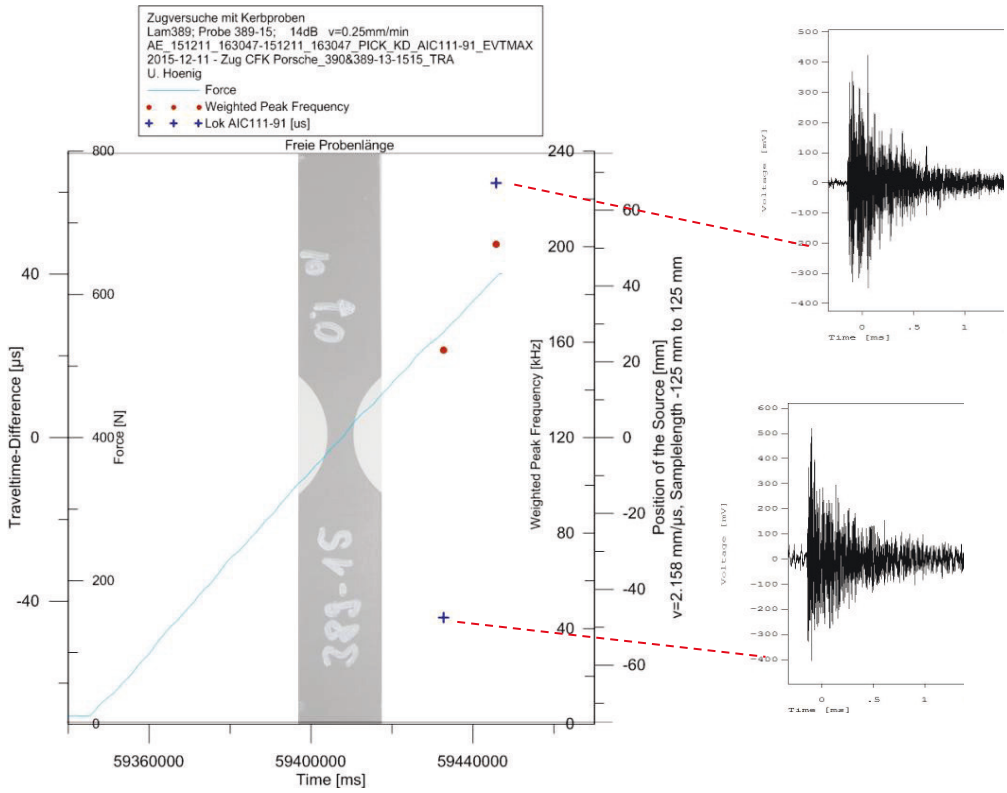
Anhang Abbildung 11 Zugprobe 384-2 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



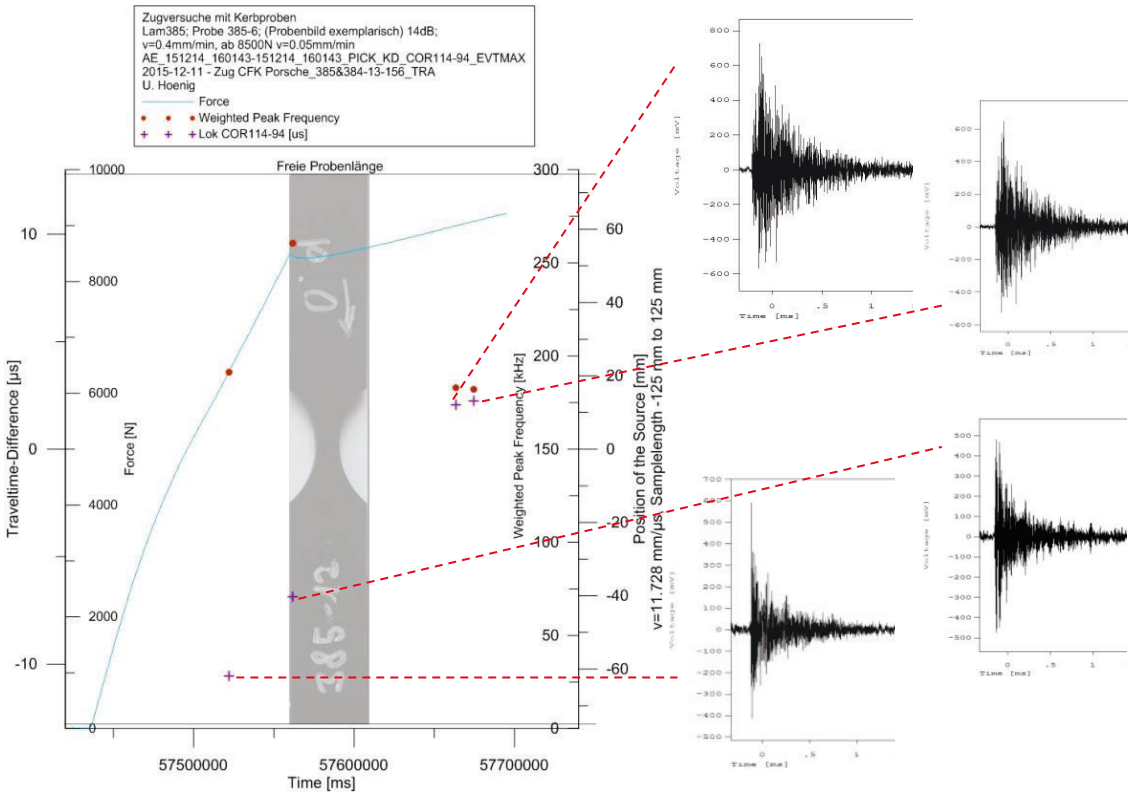
Anhang Abbildung 12 Zugprobe 384-4 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



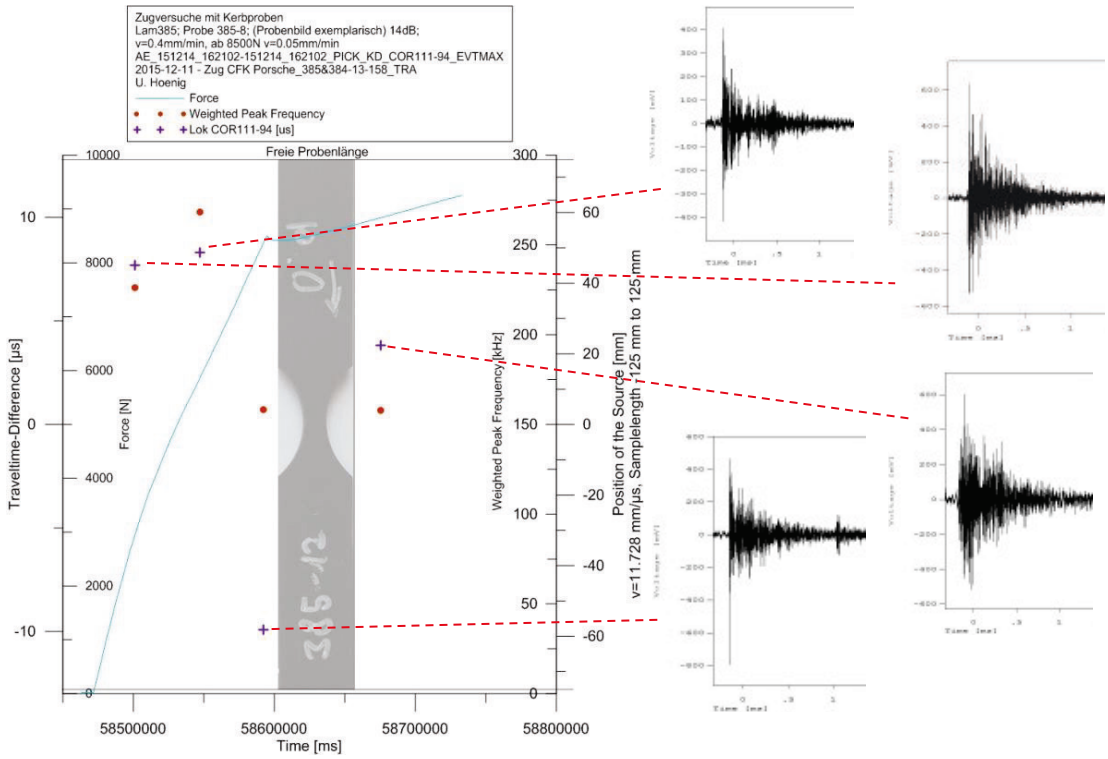
Anhang Abbildung 13 Zugprobe 390-9 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



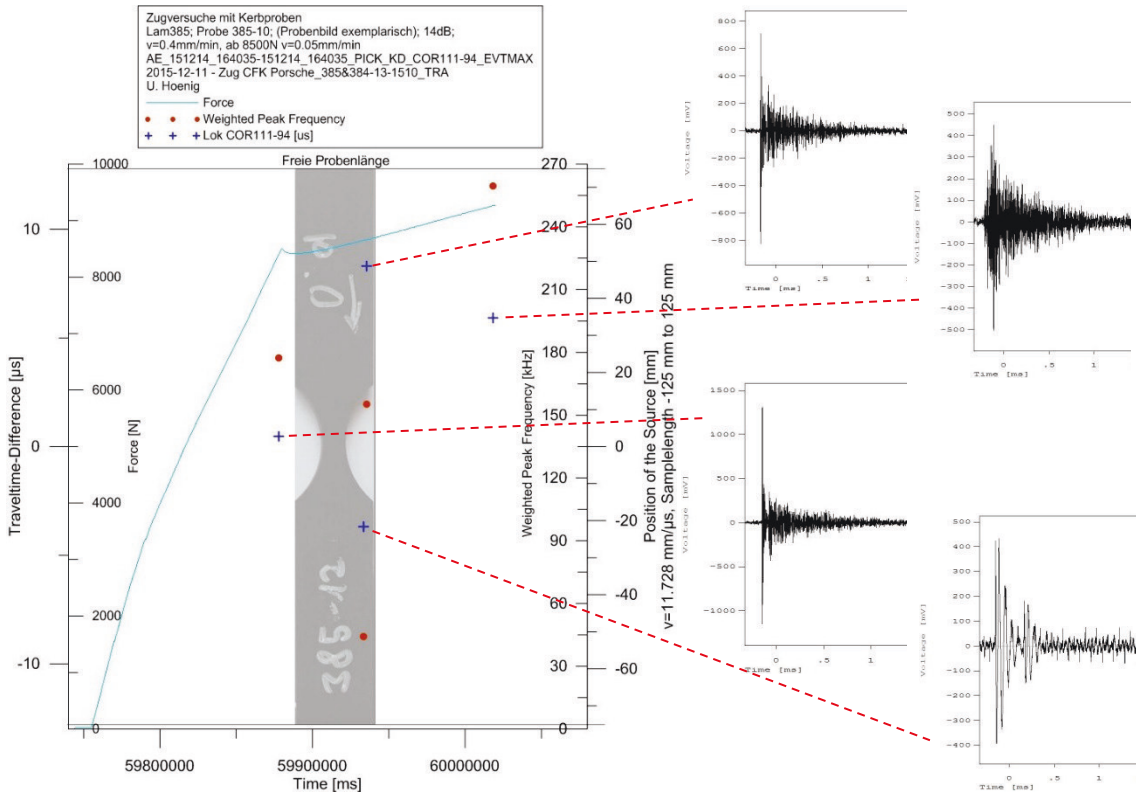
Anhang Abbildung 14 Zugprobe 389-15 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



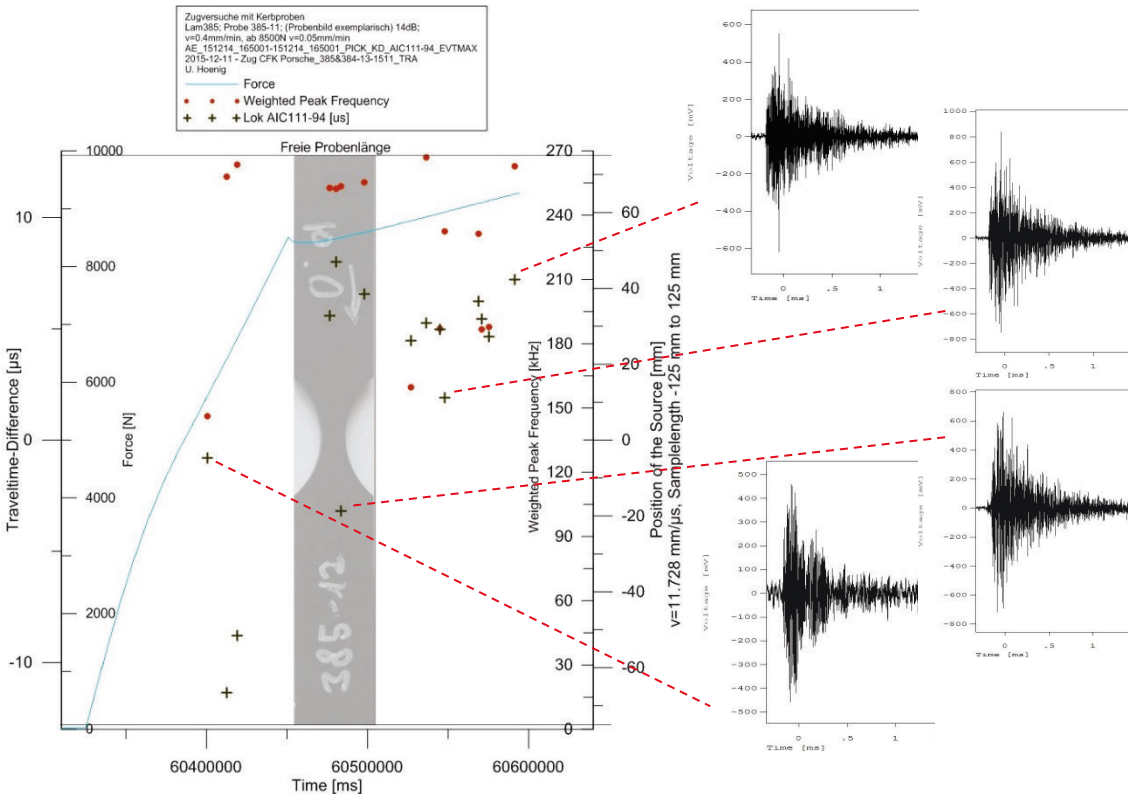
Anhang Abbildung 15 Zugprobe 385-6 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signal



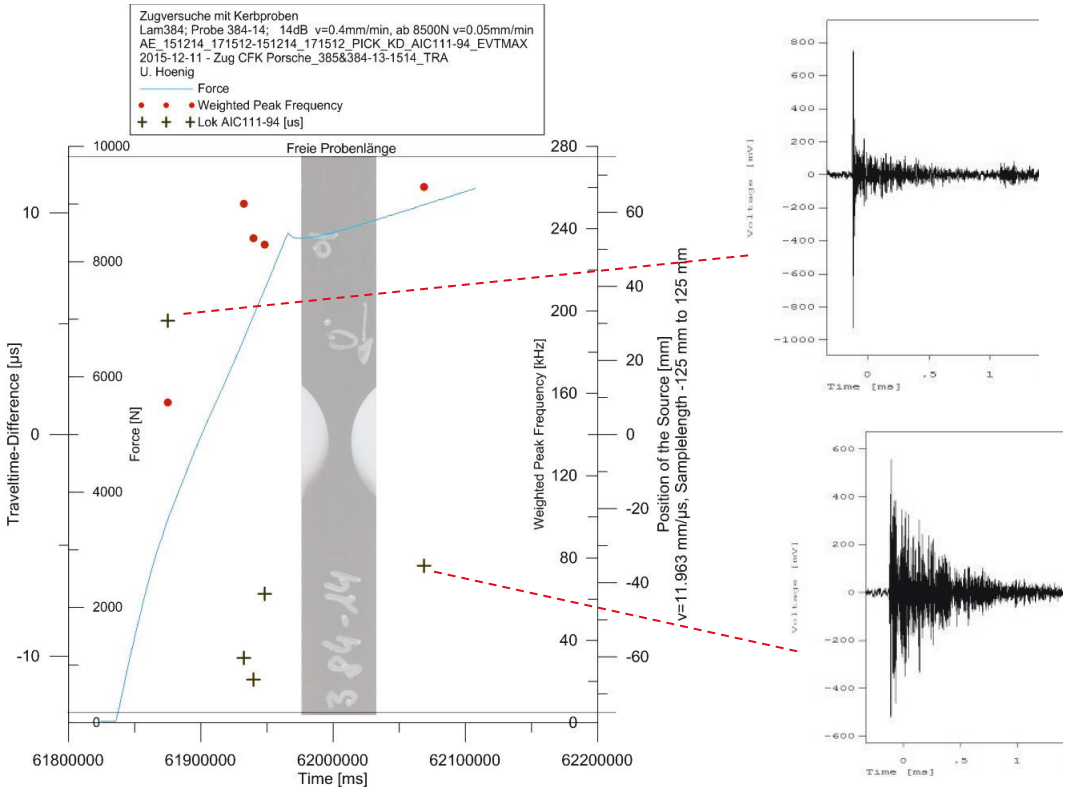
Anhang Abbildung 16 Zugprobe 385-8 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



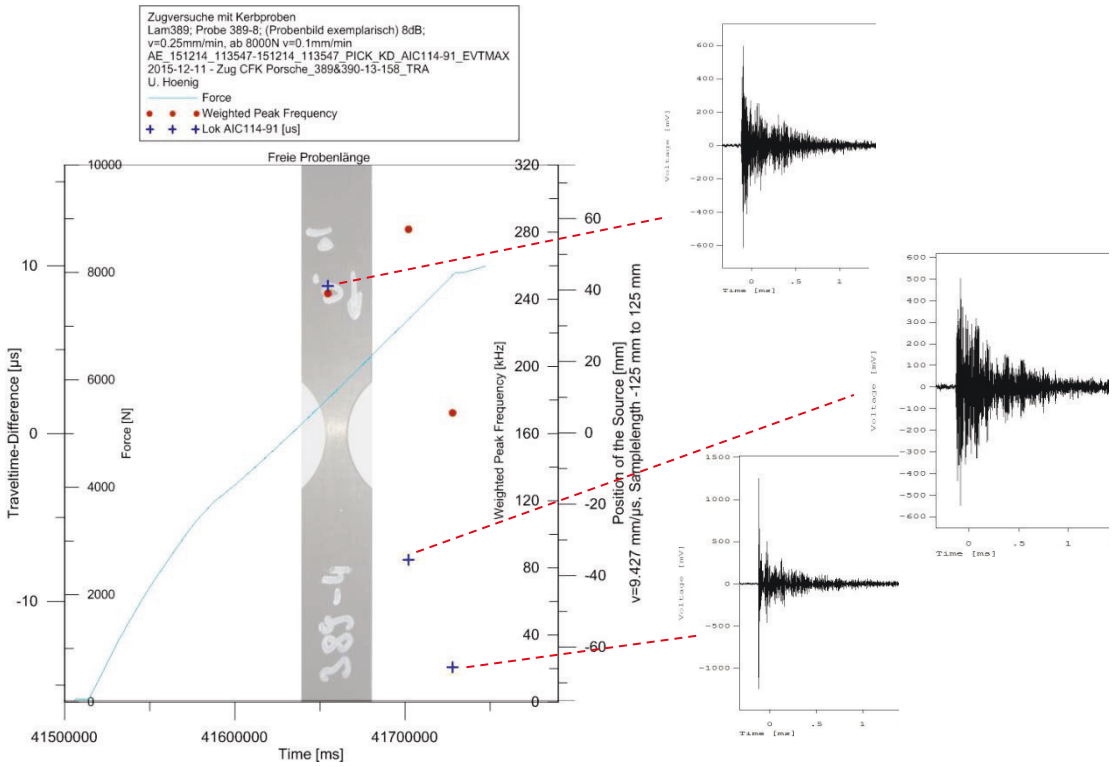
Anhang Abbildung 17 Zugprobe 385-10 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



Anhang Abbildung 18 Zugprobe 385-11 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



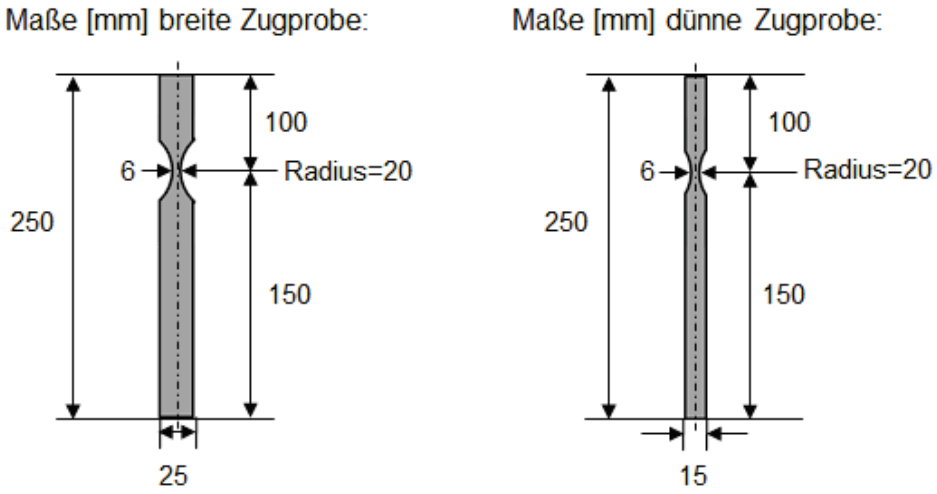
Anhang Abbildung 19 Zugprobe 384-14 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale



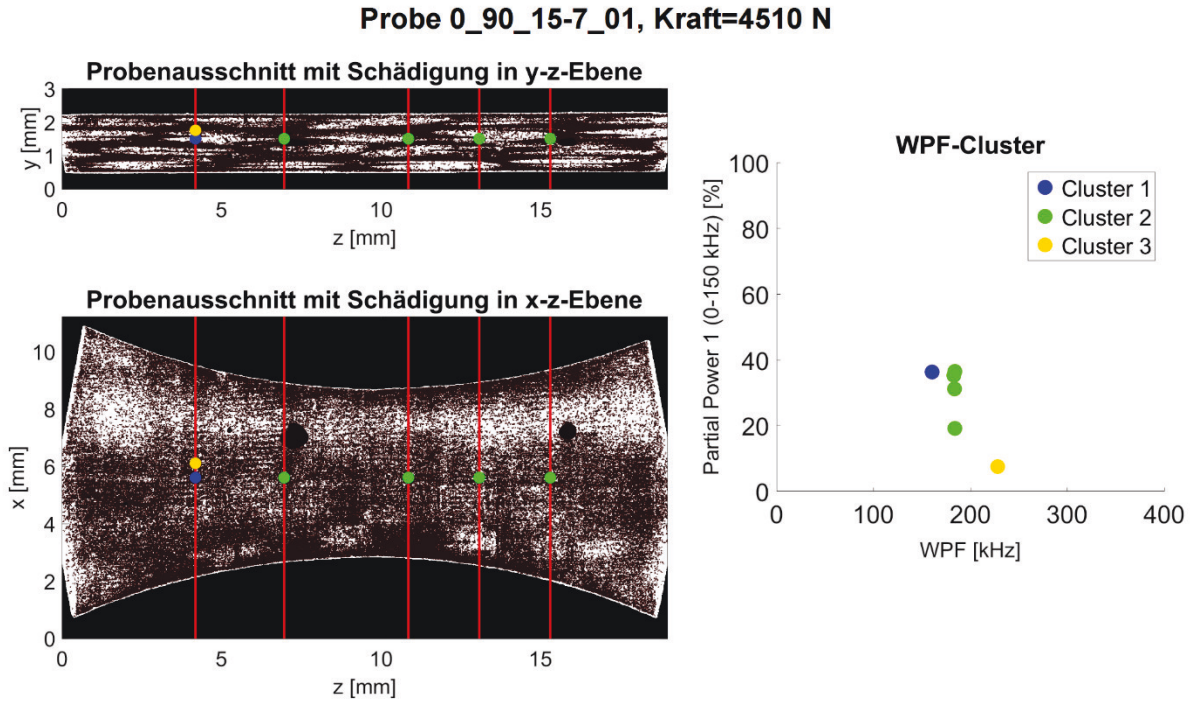
Anhang Abbildung 20 Zugprobe 389-8 Schallemissionssignalverhalten (links) und transiente Signale

Laminat	Lagenaufbau	Lagenanzahl	Probenanzahl	CT	Zweck der Prüfung
474-T	0/90°	6	14	-	Vorversuche für CT
475-T	±45°	6	14	-	Vorversuche für CT
476-T	QI	6	14	-	Vorversuche für CT
943	0/90°	8	5	-	Vergleich Fasermaterial
944	±45°	8	5	-	Vergleich Fasermaterial
945	QI	8	5	-	Vergleich Fasermaterial
951	0/90°	6	5	-	Vergleichsuntersuchung
952	±45°	6	5	-	Vergleichsuntersuchung
953	QI	6	4	-	Vergleichsuntersuchung
955	0/90°	4	5	-	Einführungsmessungen
956	±45°	4	5	-	Einführungsmessungen
957	QI	4	4	-	Einführungsmessungen
958	0/90°	4	5	-	Einführungsmessungen
959	±45°	4	5	-	Einführungsmessungen
960	QI	4	5	-	Einführungsmessungen
961	0/90°	12	4	-	Vergleich Fasermaterial
962	±45°	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
963	QI	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
964	0/90°	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
965	±45°	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
966	QI	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
967	0/90°	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
968	±45°	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
969	QI	12	5	-	Vergleich Fasermaterial
0/90-15-T	0/90°	4	15	5	in-situ-CT-Untersuchung
0/90-25-T	0/90°	4	15	-	in-situ-CT-Untersuchung
45-15-T	±45°	4	15	5	in-situ-CT-Untersuchung
45-25-T	±45°	4	15	-	in-situ-CT-Untersuchung
QI-15-T	QI	4	15	5	in-situ-CT-Untersuchung
QI-25-T	QI	4	15	-	in-situ-CT-Untersuchung

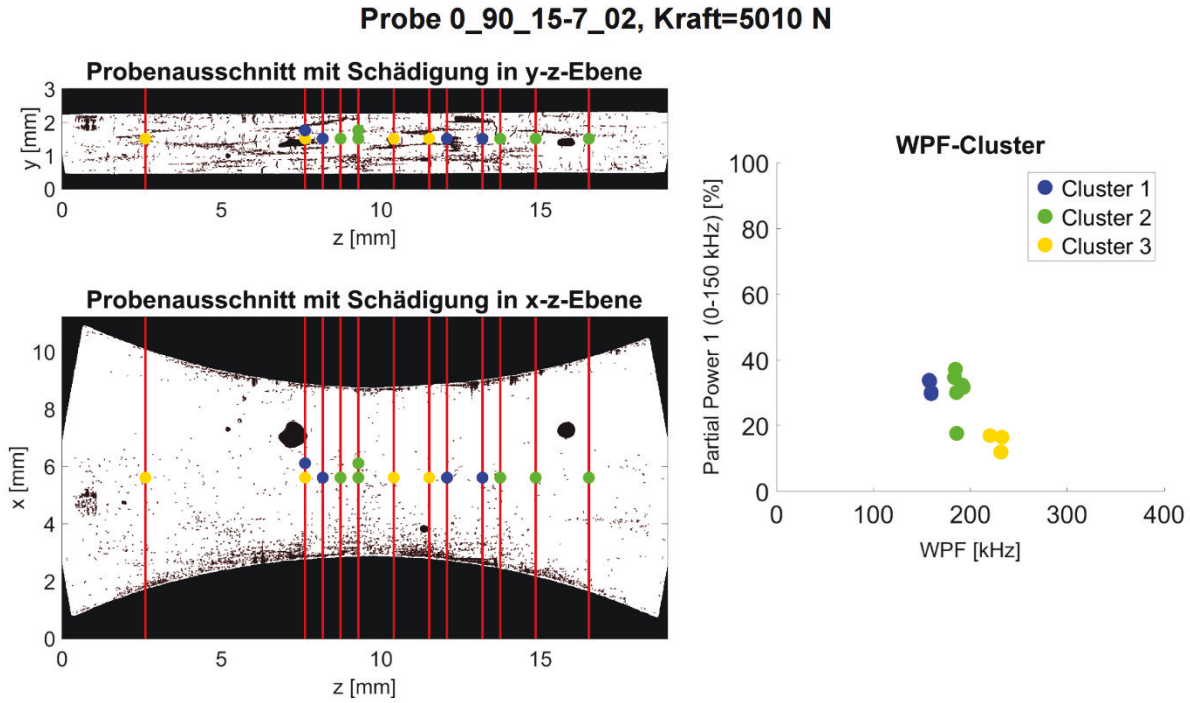
Anhang Tabelle 11 Übersicht der durch Zugprüfung geprüften Laminate in Vorbereitung der in-situ CT-Untersuchungen und zur Validierung der Schädigungscluster; T gibt an, dass die Hälfte der Proben dieses Laminates tailliert hergestellt wurde



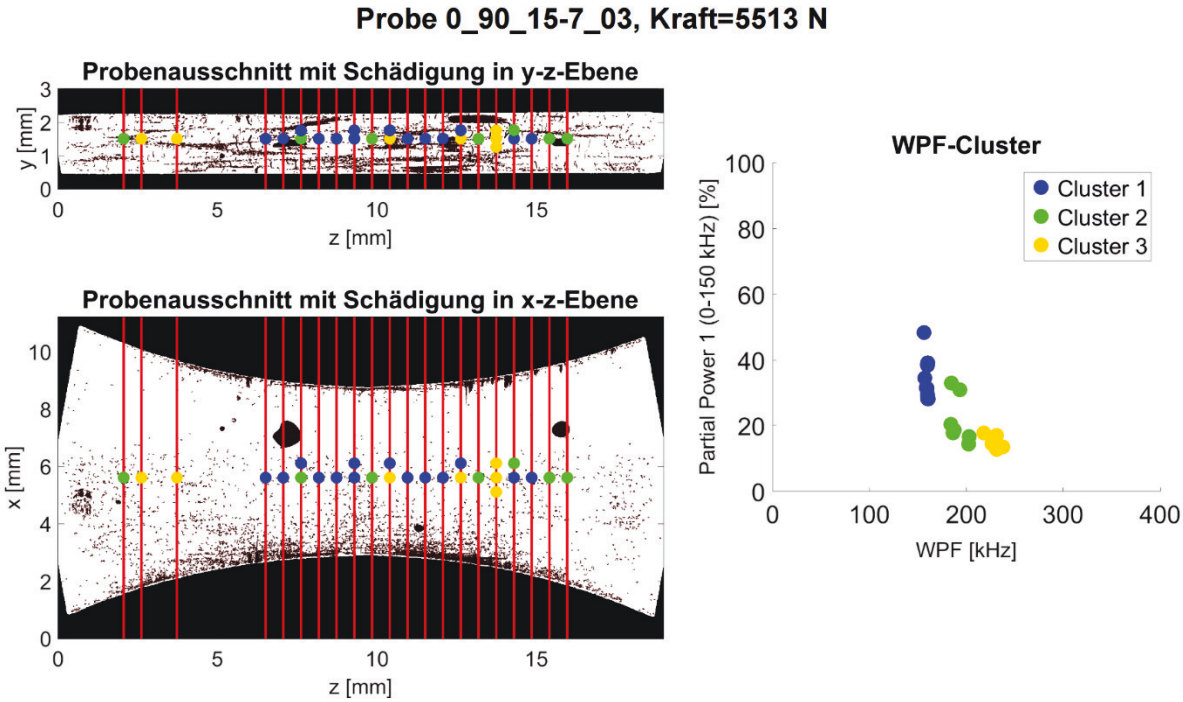
Anhang Abbildung 21 Schematische Zeichnungen der taillierten Proben mit unterschiedlicher Breite (Hönig U. , 2016)



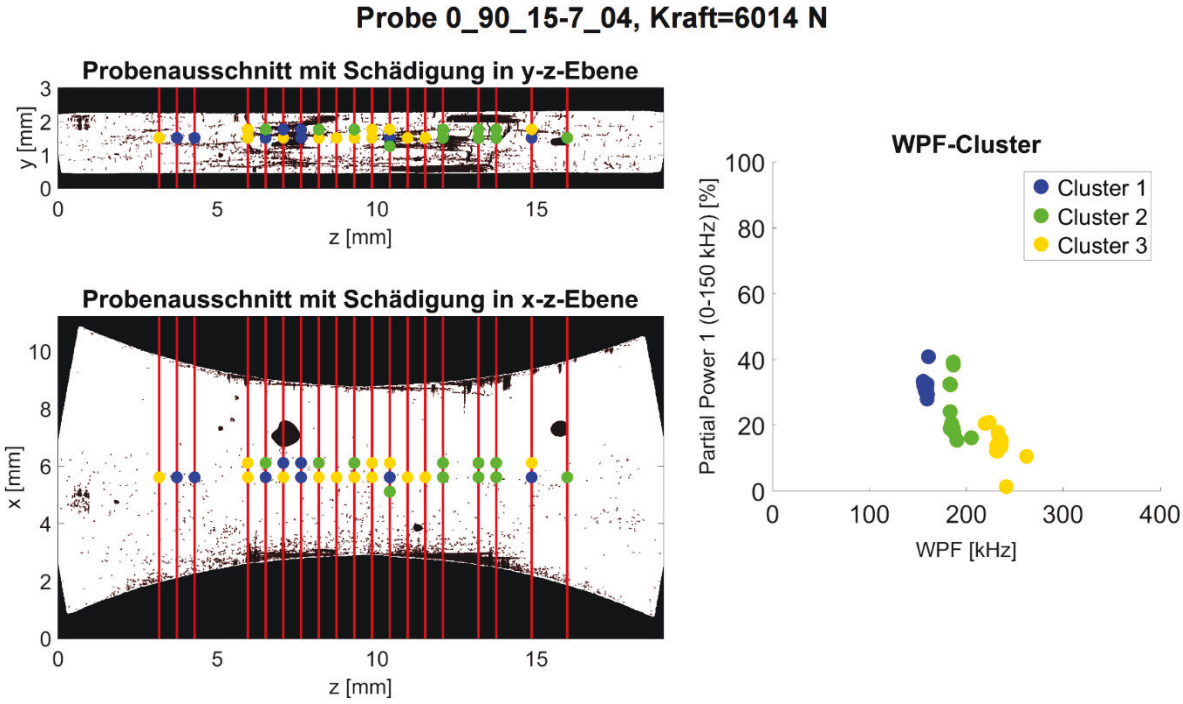
Anhang Abbildung 22 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 4510 N



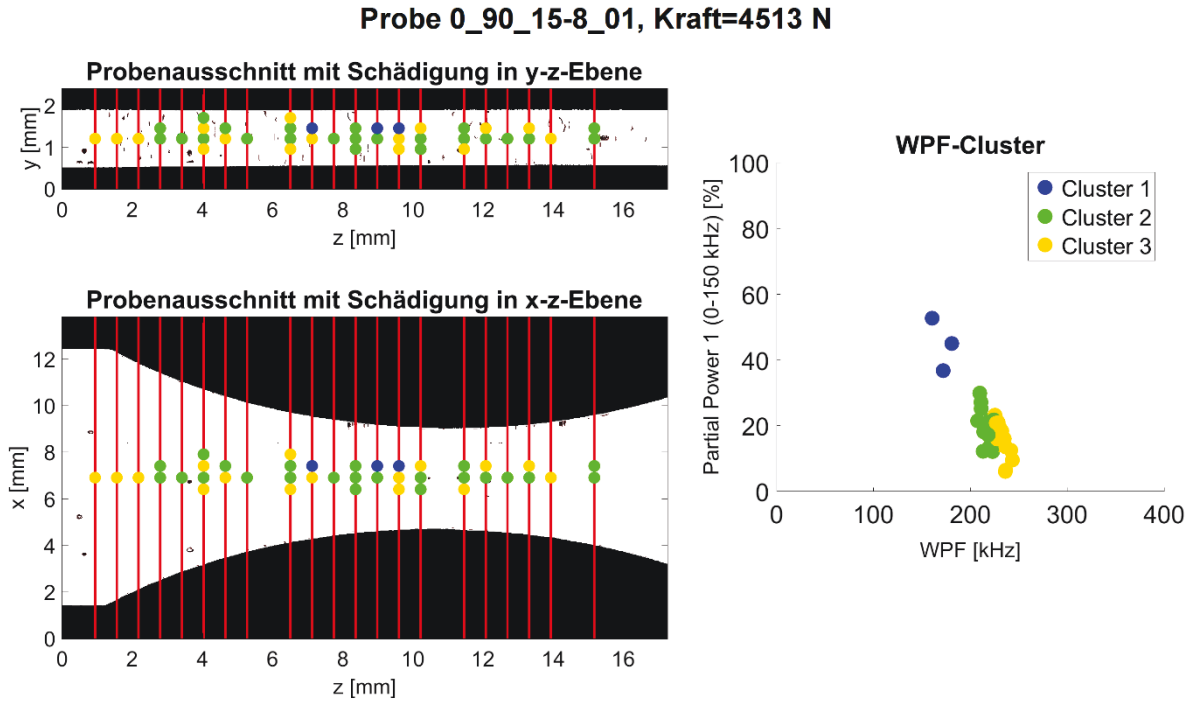
Anhang Abbildung 23 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 5010 N



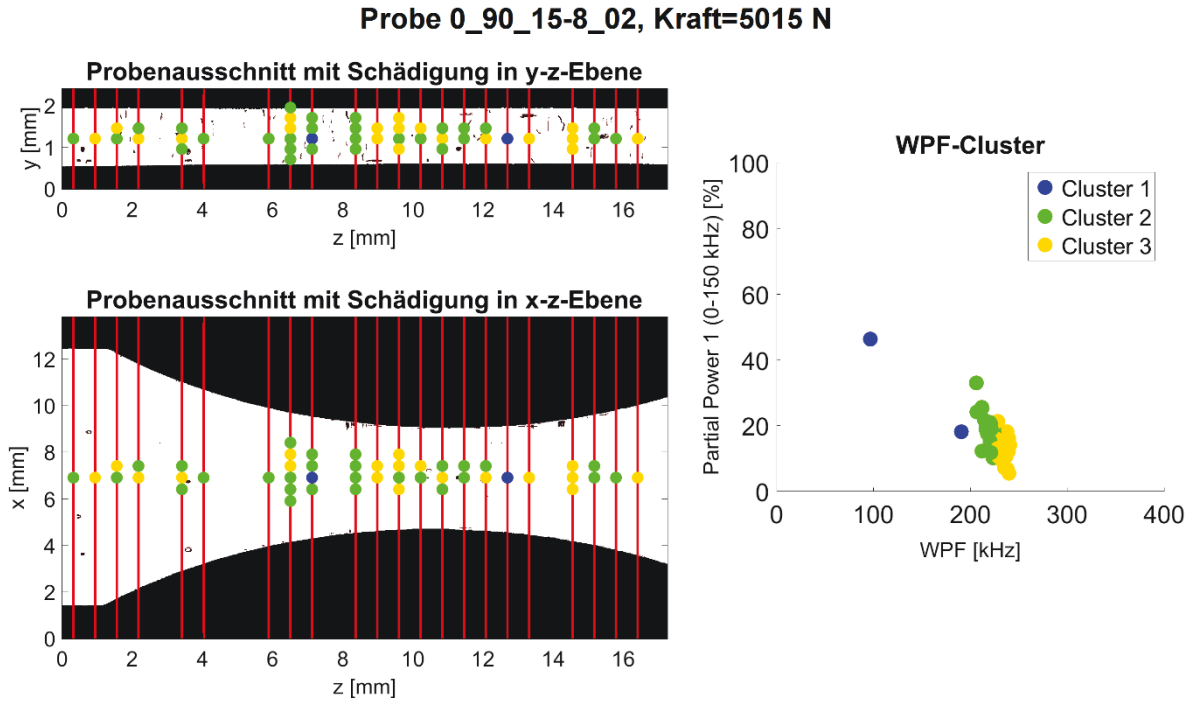
Anhang Abbildung 24 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 5513 N



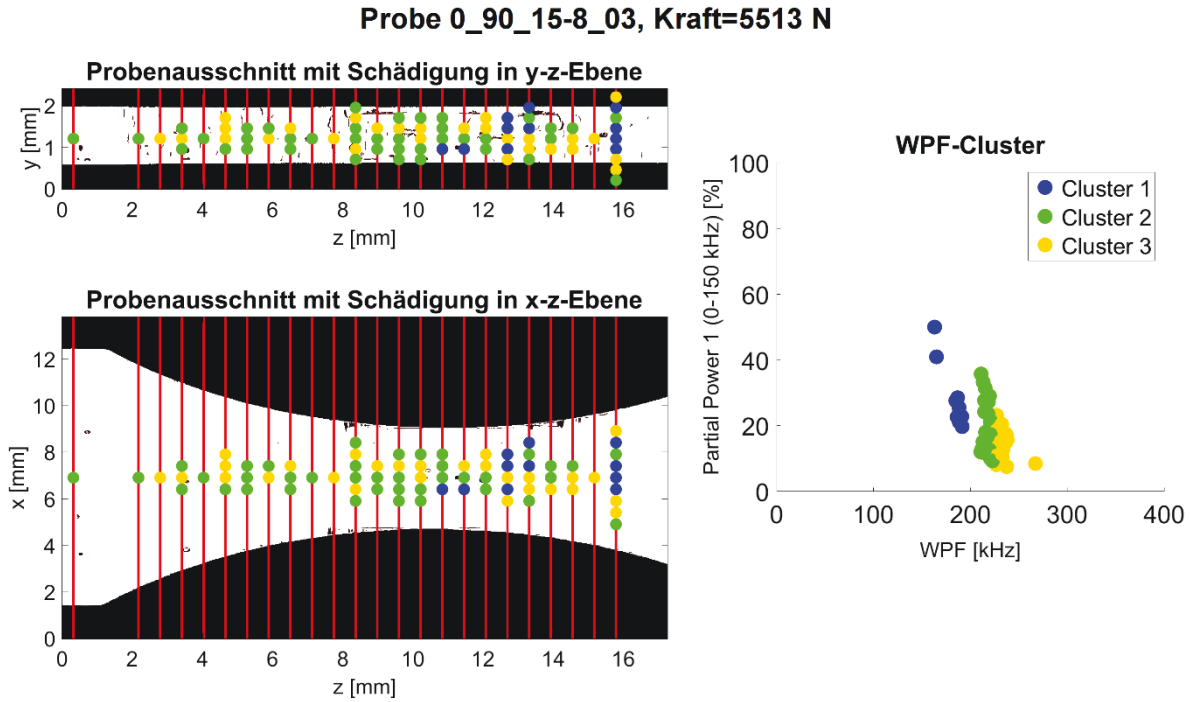
Anhang Abbildung 25 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 6014 N



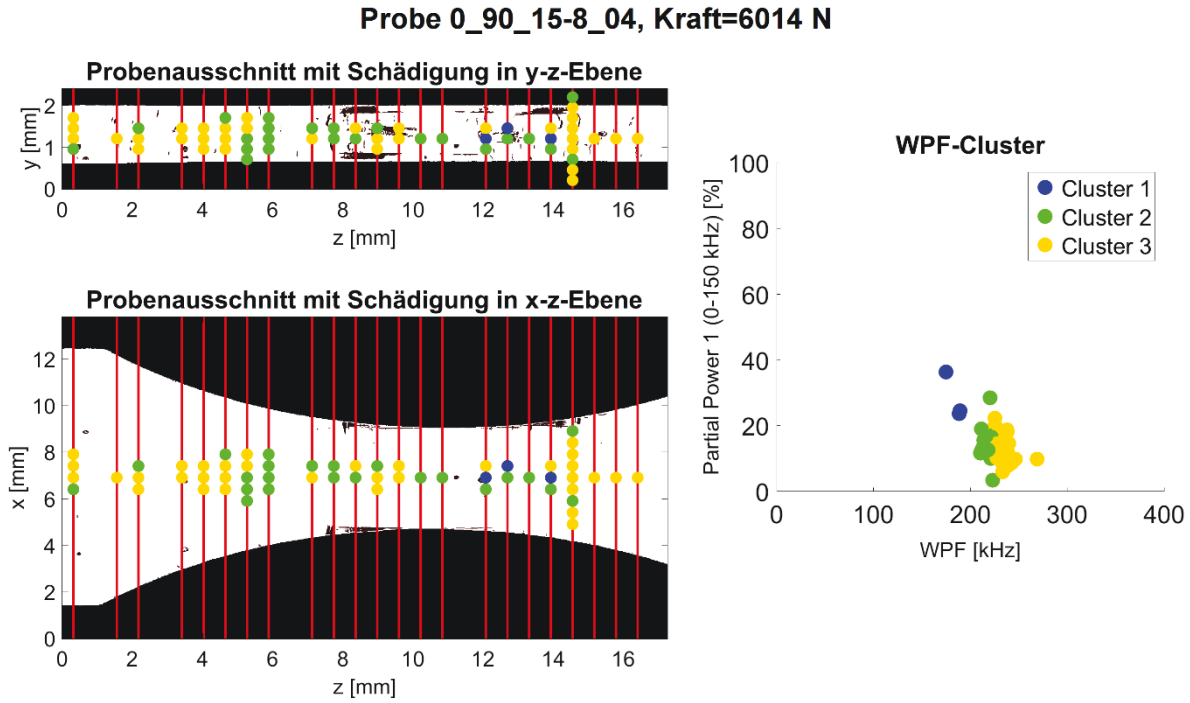
Anhang Abbildung 26 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 4513 N



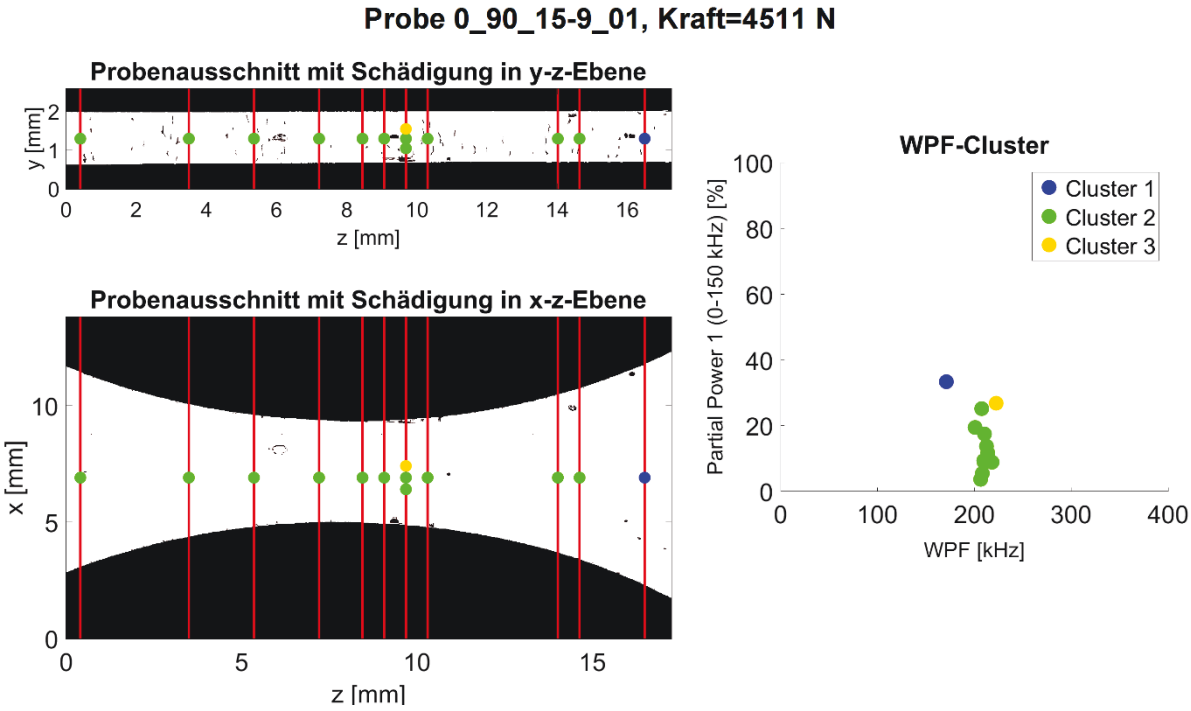
Anhang Abbildung 27 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 5015 N



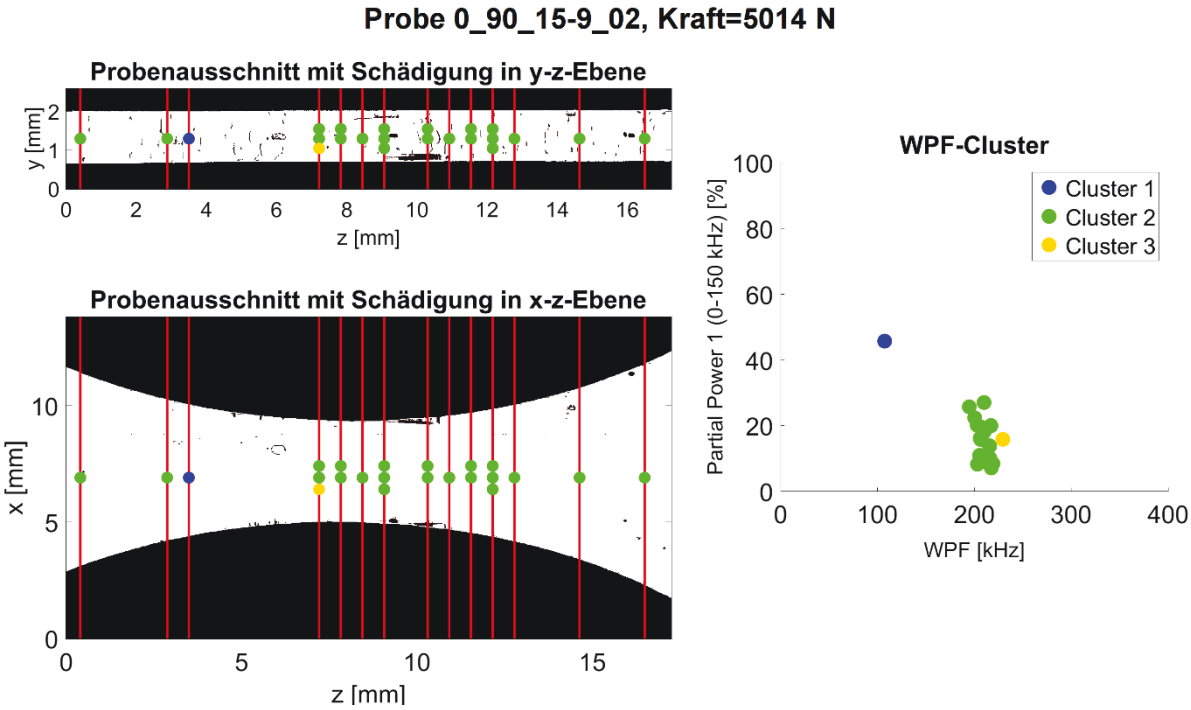
Anhang Abbildung 28 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 5513 N



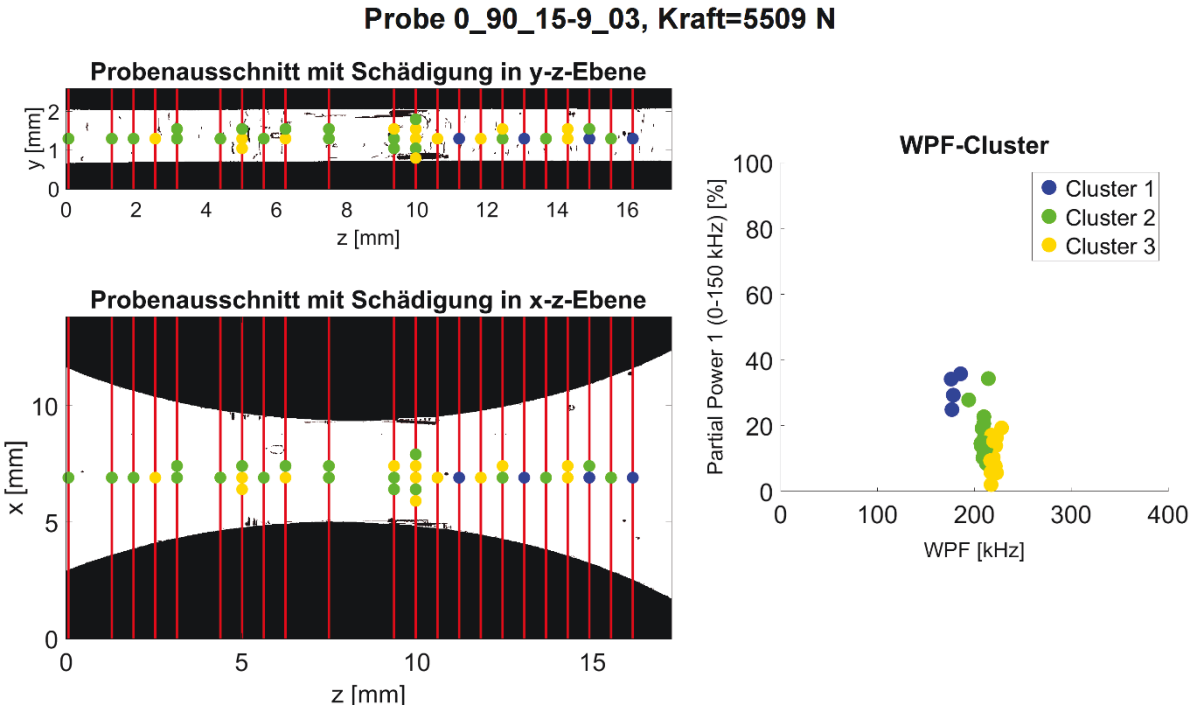
Anhang Abbildung 29 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 6014 N



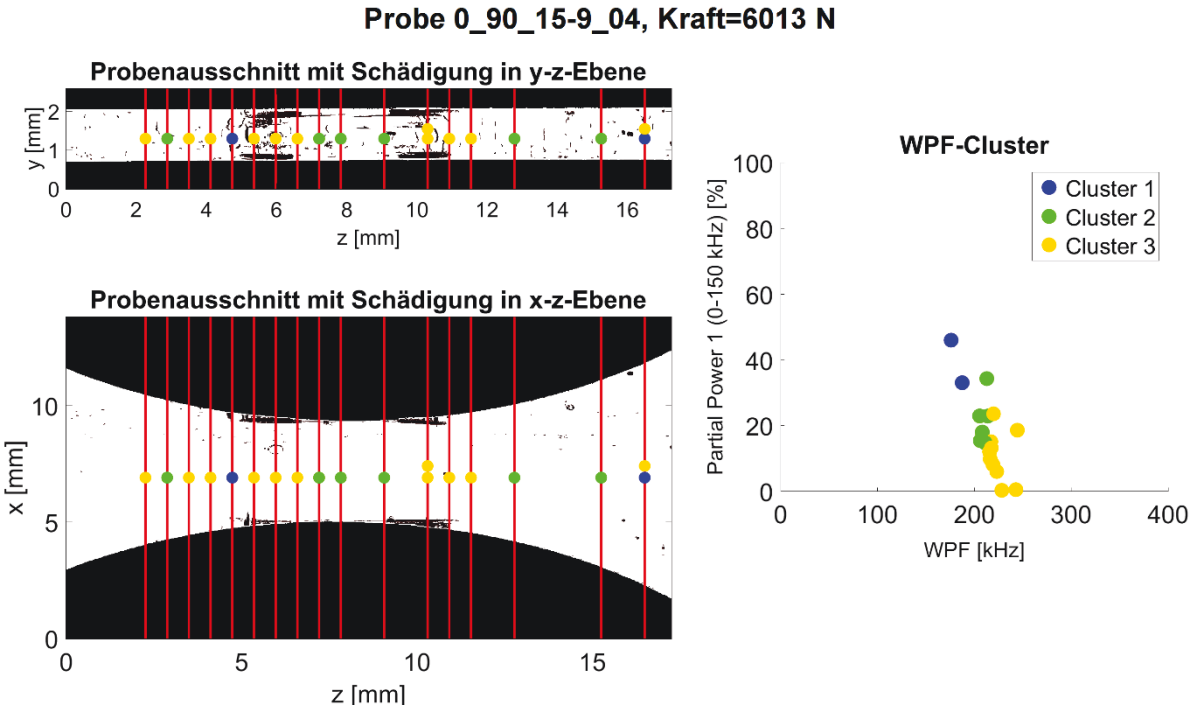
Anhang Abbildung 30 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 4511 N



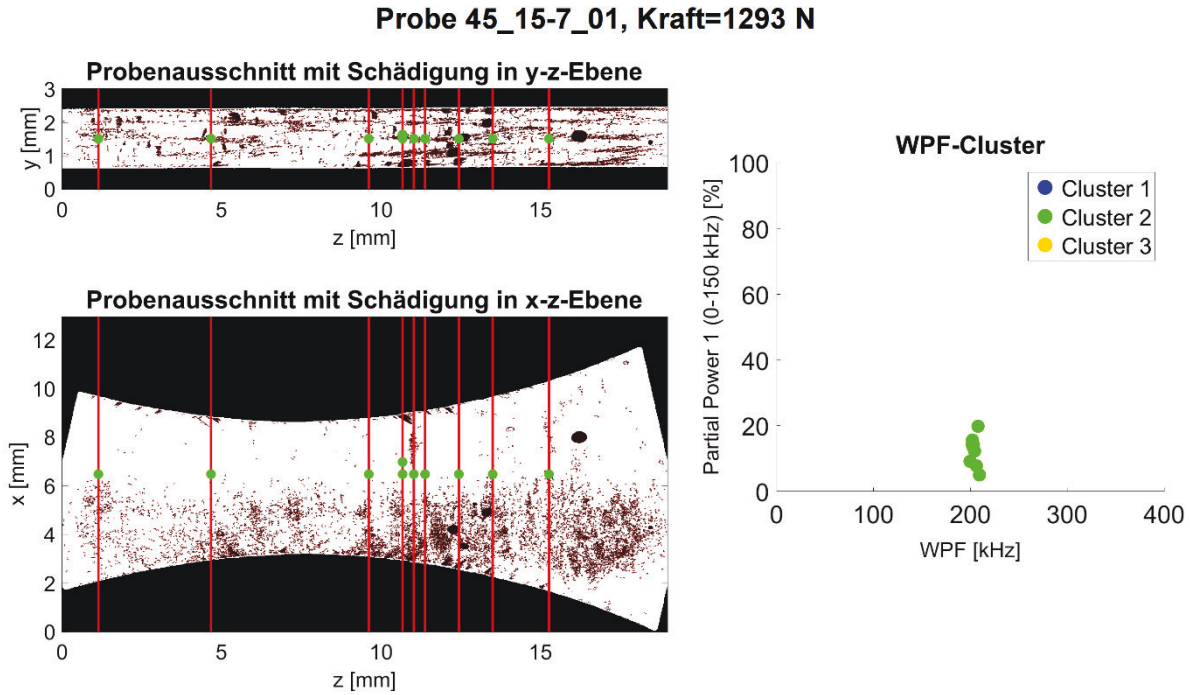
Anhang Abbildung 31 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 5014 N



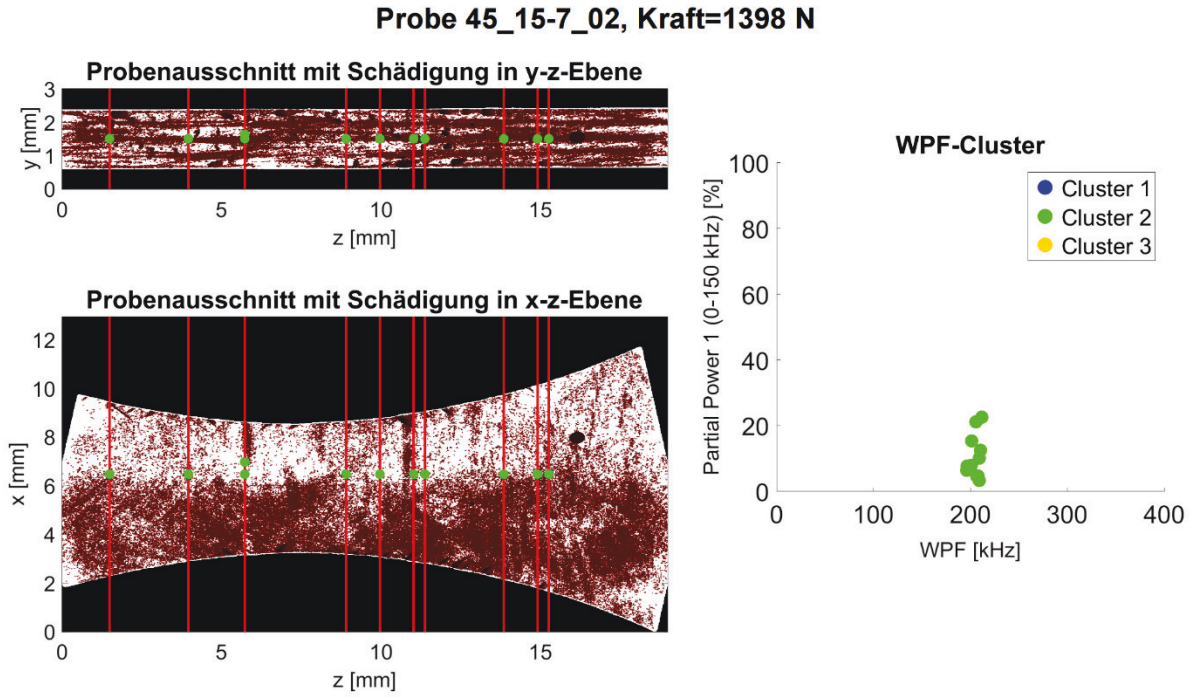
Anhang Abbildung 32 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 5509 N



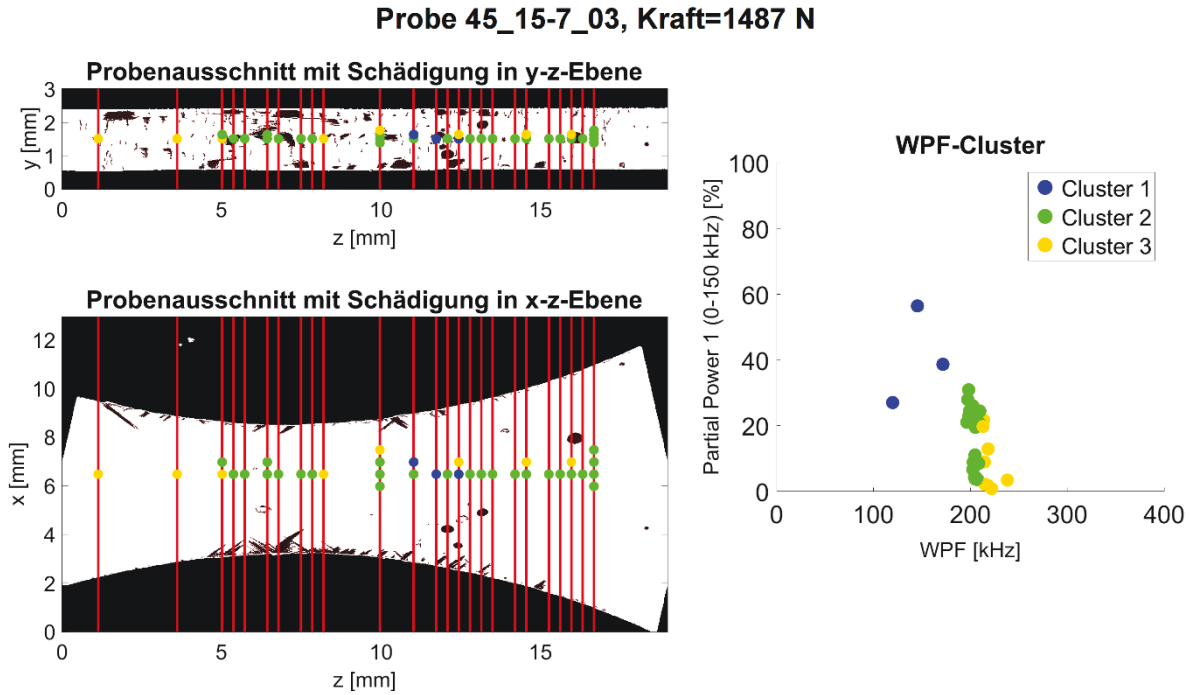
Anhang Abbildung 33 CT-Untersuchung einer 0/90 Probe bei einer Zugbelastung von 6013 N



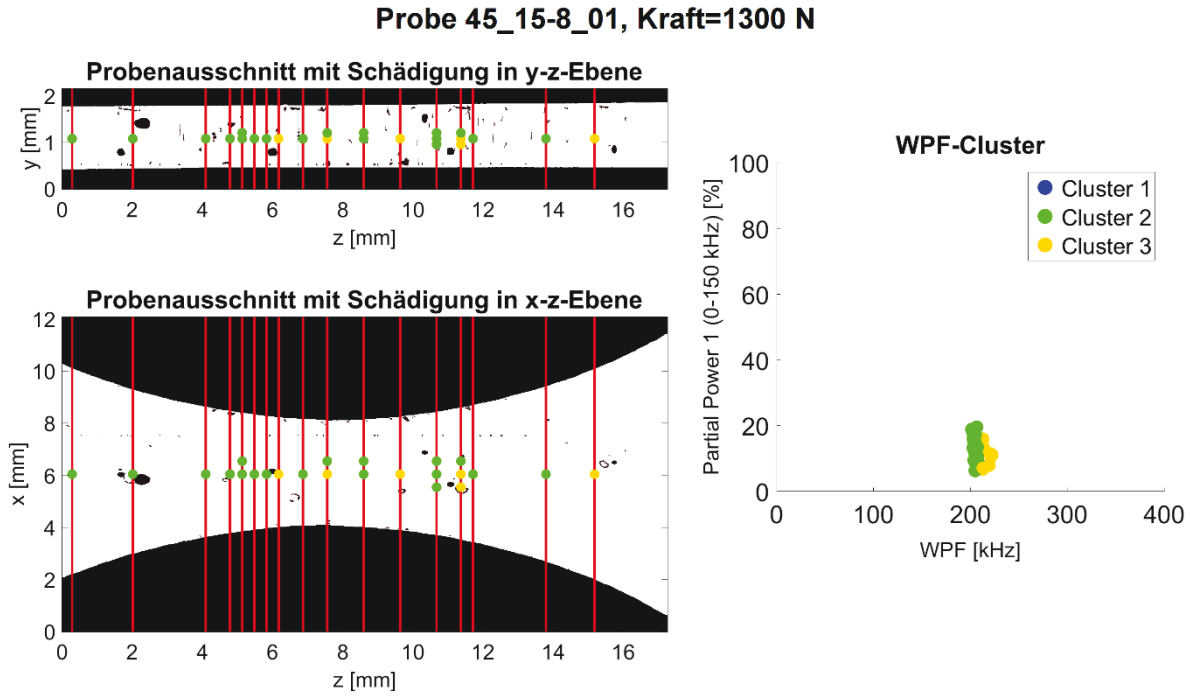
Anhang Abbildung 34 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1293 N



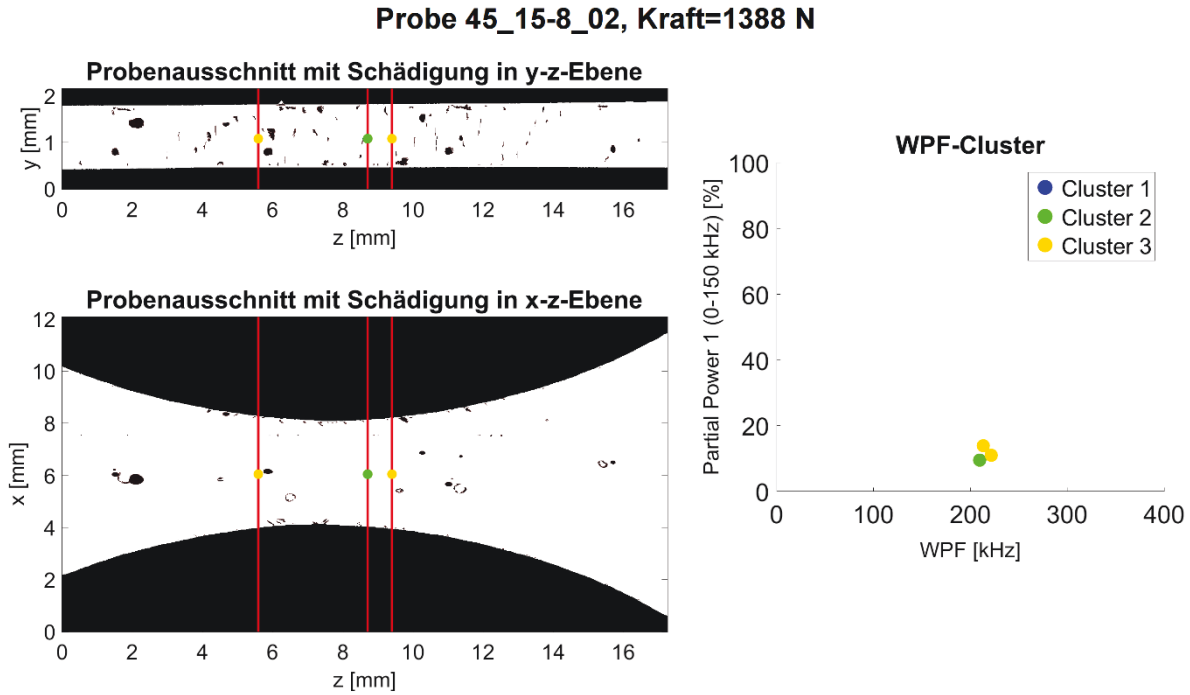
Anhang Abbildung 35 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1398 N



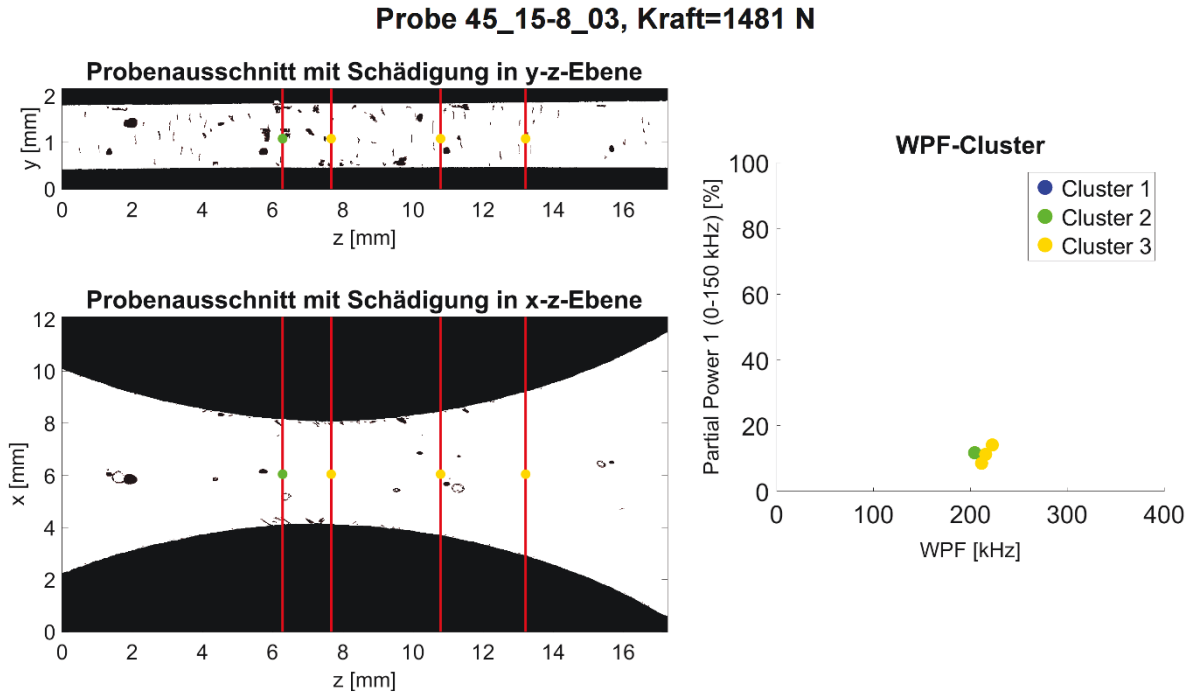
Anhang Abbildung 36 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1487 N



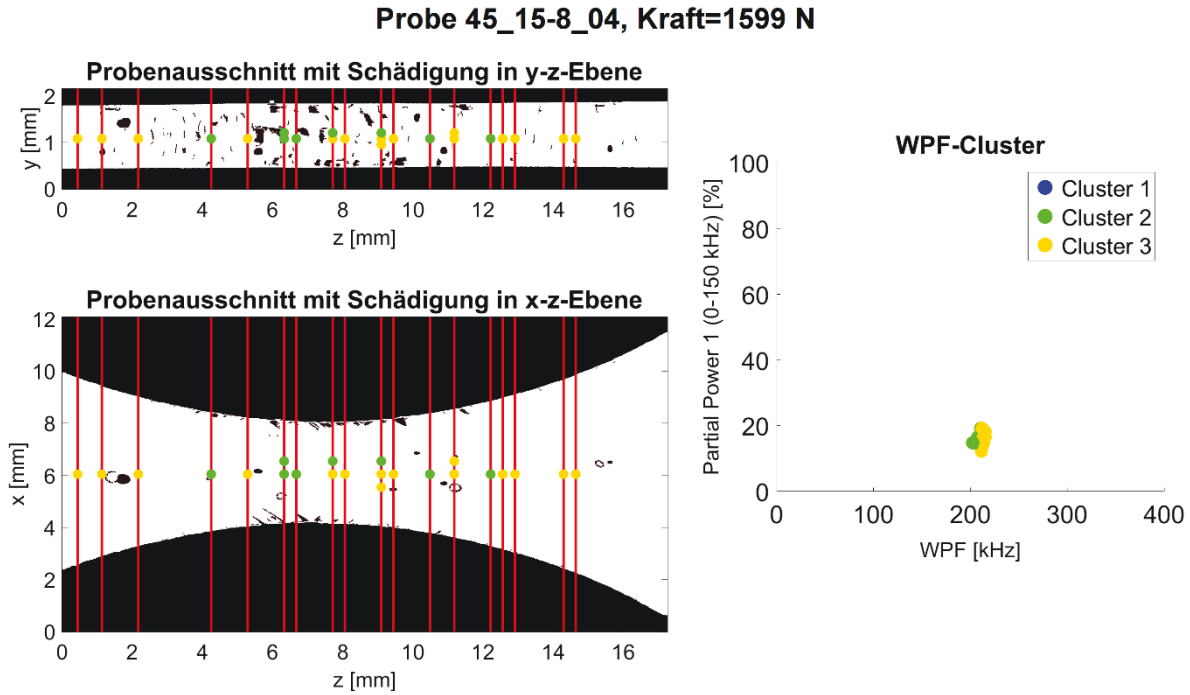
Anhang Abbildung 37 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1300 N



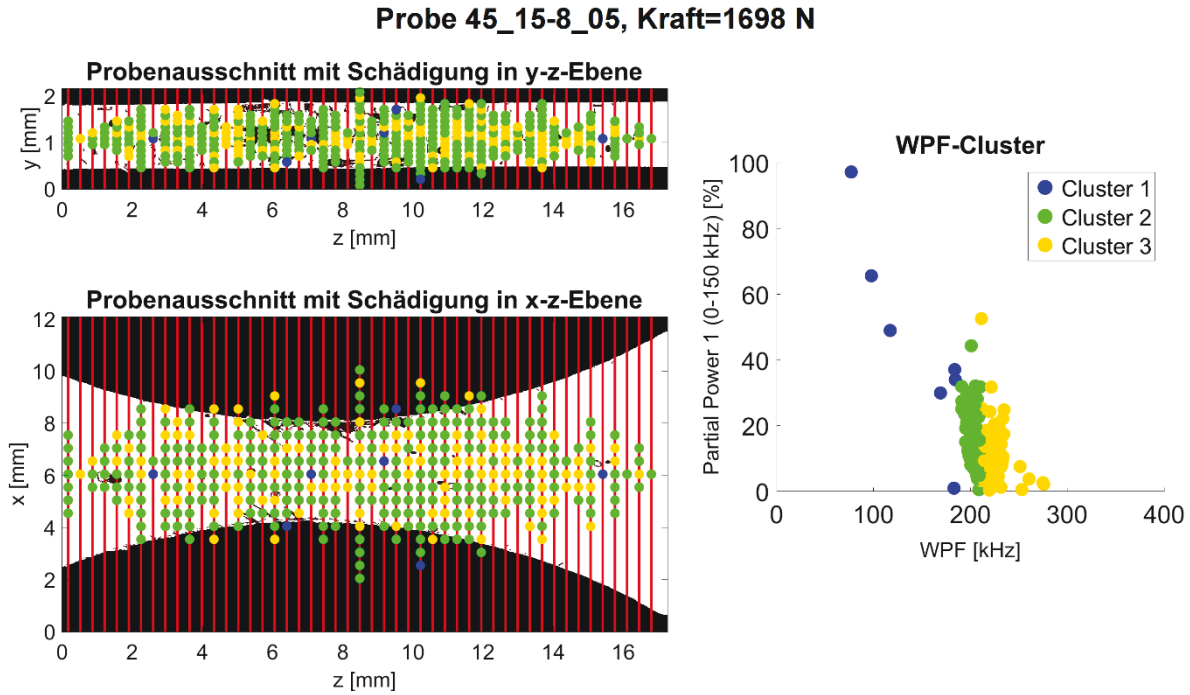
Anhang Abbildung 38 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1388 N



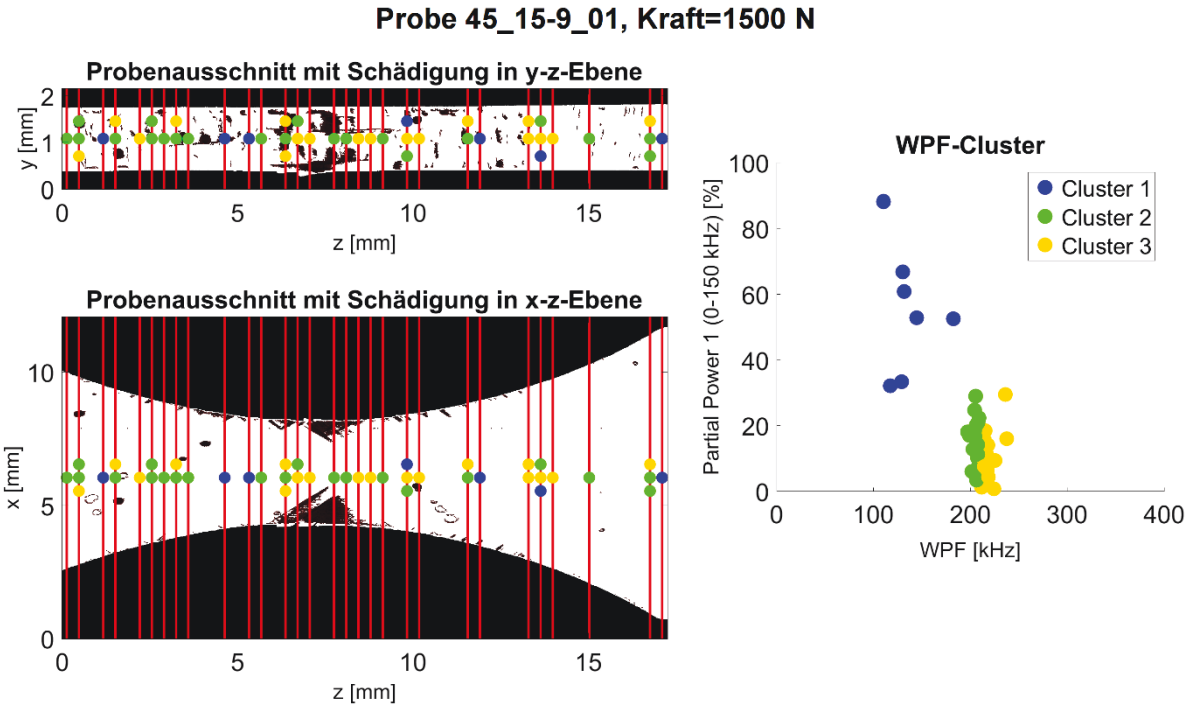
Anhang Abbildung 39 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1481 N



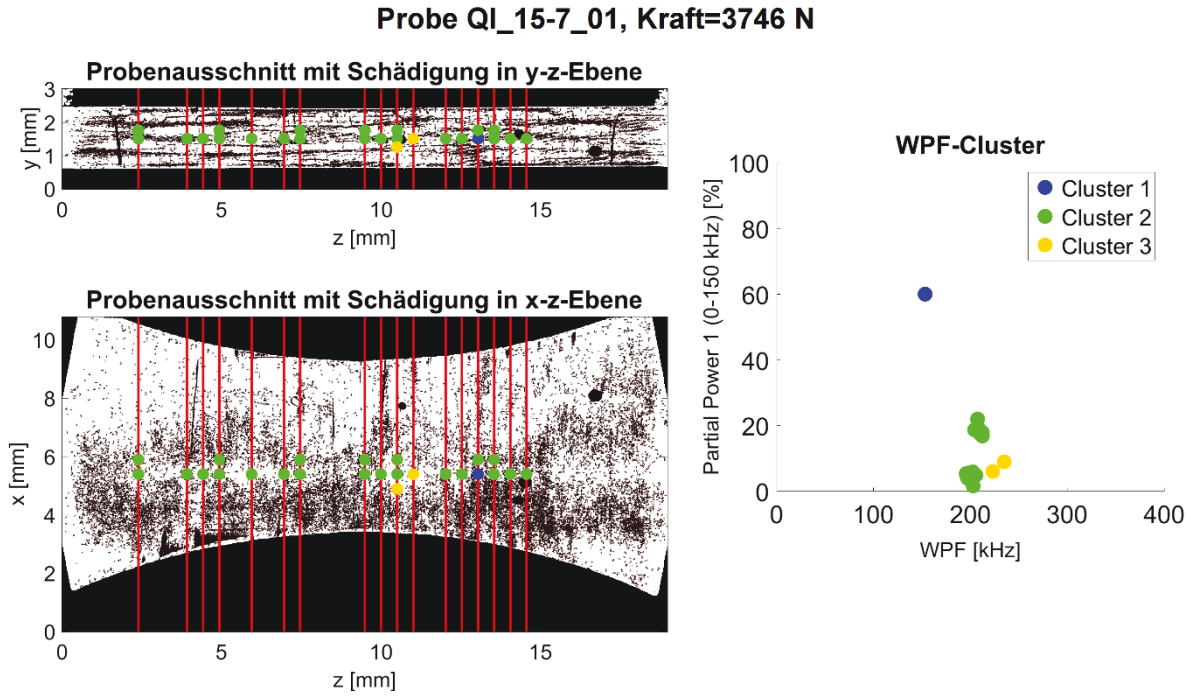
Anhang Abbildung 40 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1599 N



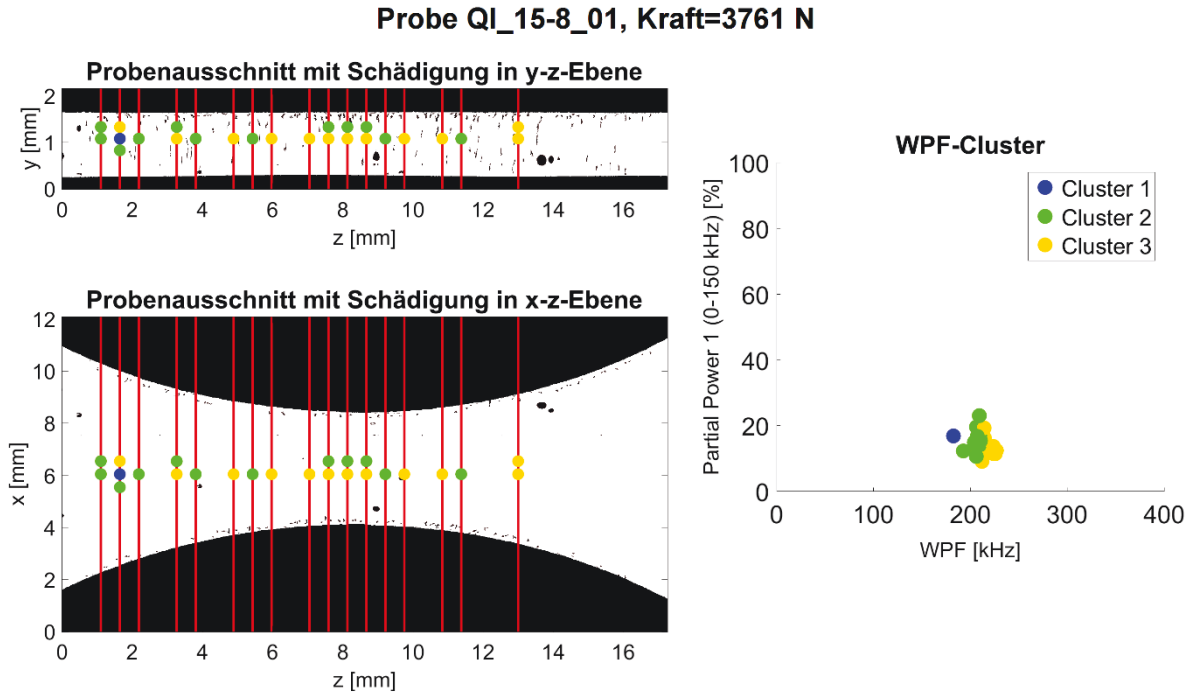
Anhang Abbildung 41 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1698 N



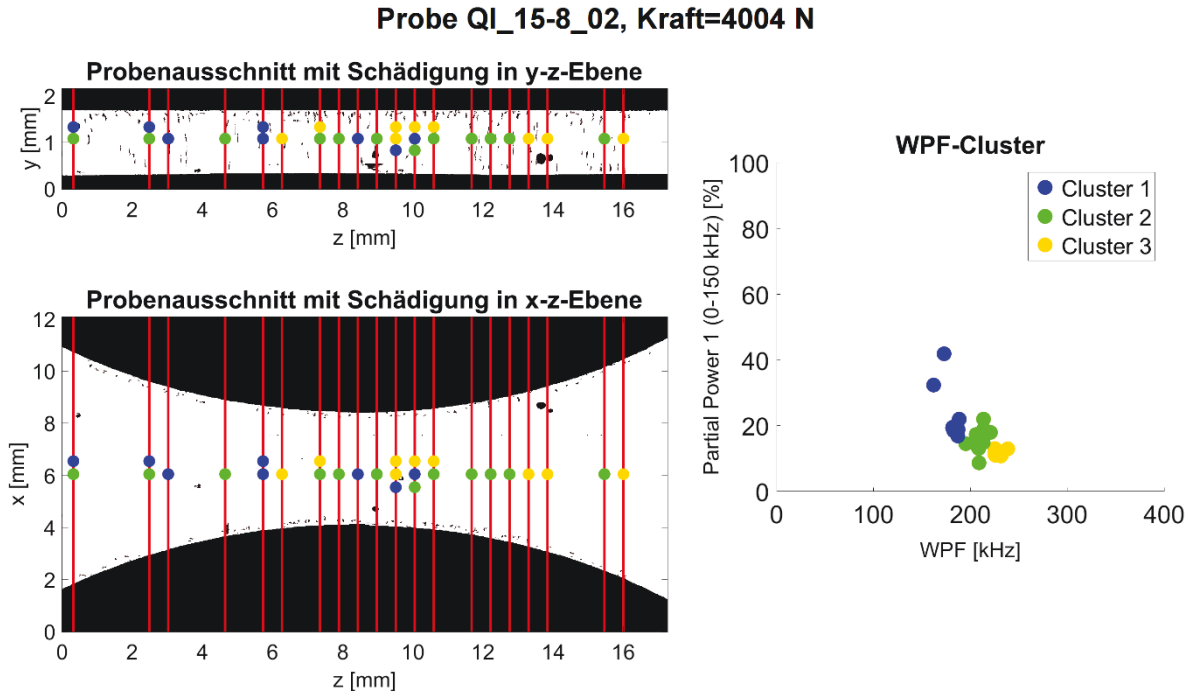
Anhang Abbildung 42 CT-Untersuchung einer ±45 Probe bei einer Zugbelastung von 1500 N



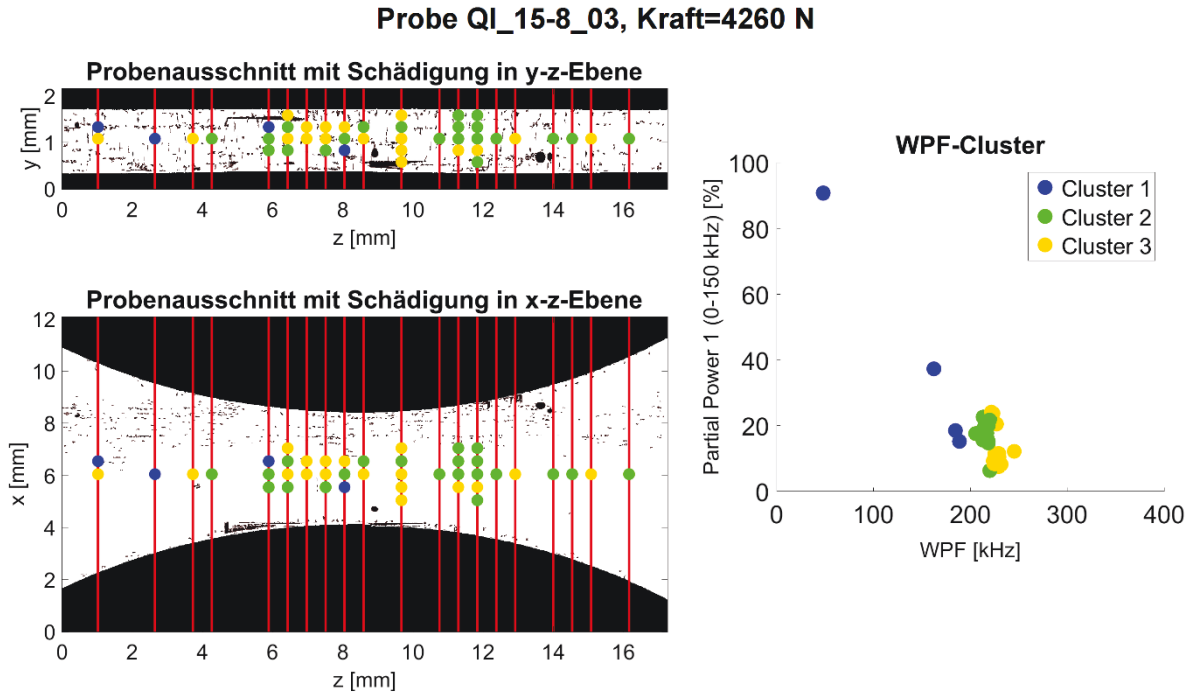
Anhang Abbildung 43 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 3746 N



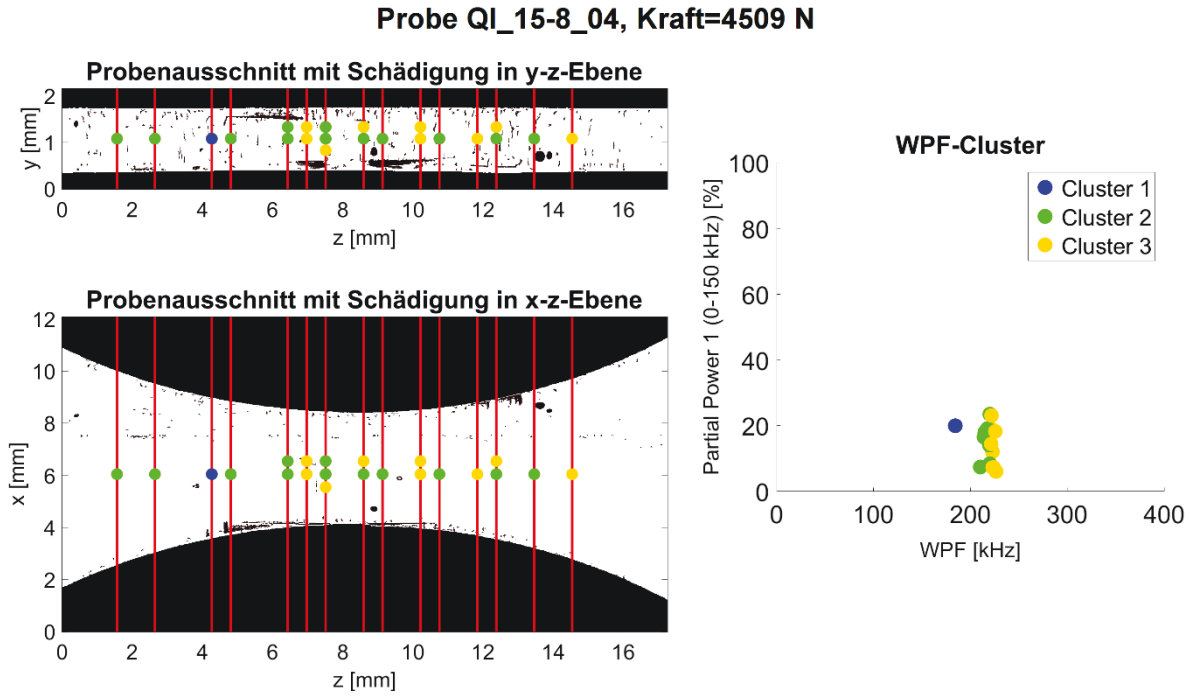
Anhang Abbildung 44 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 3761 N



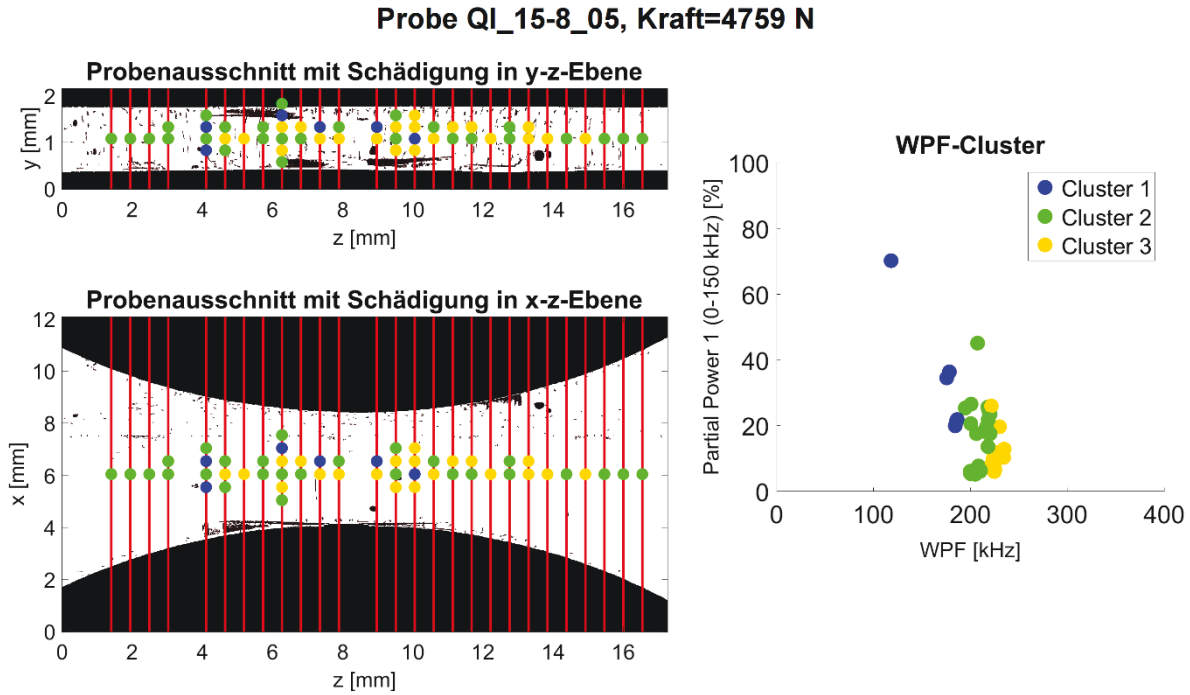
Anhang Abbildung 45 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4004 N



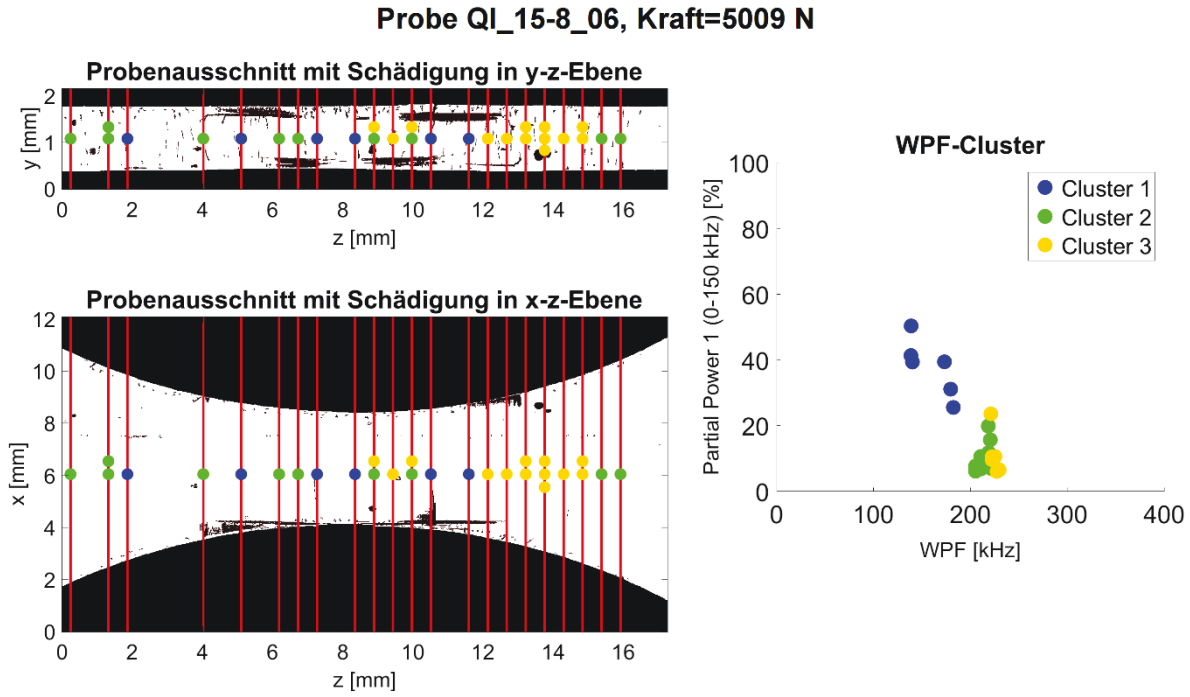
Anhang Abbildung 46 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 3746 N



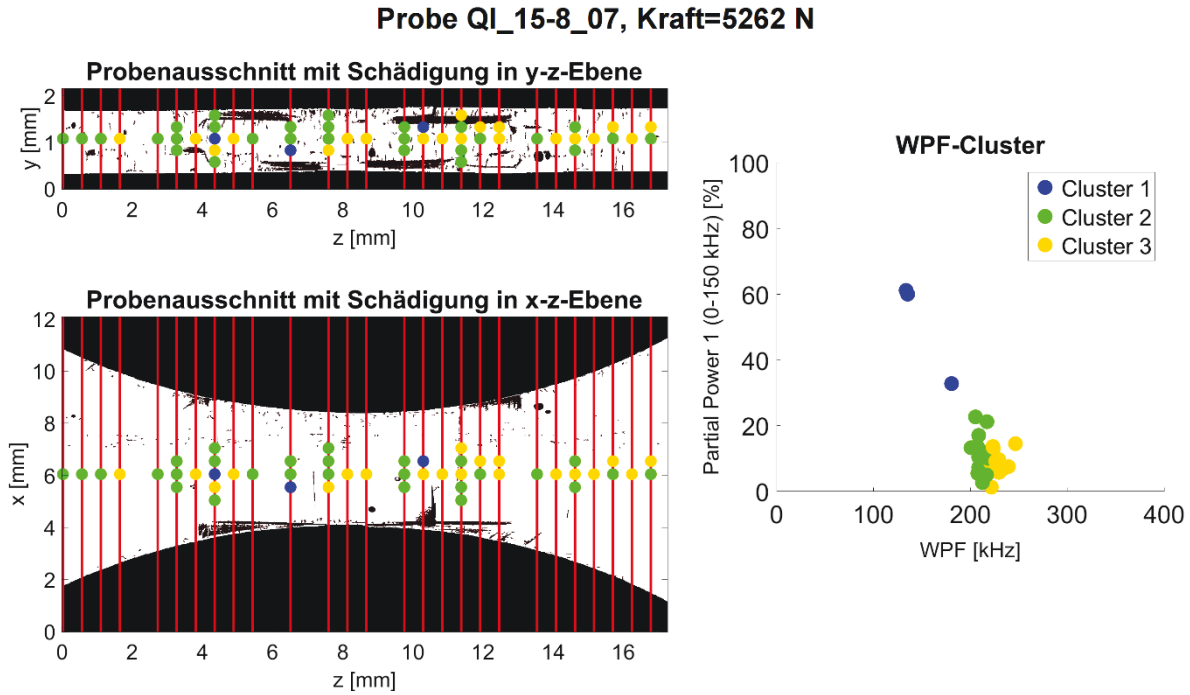
Anhang Abbildung 47 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4509 N



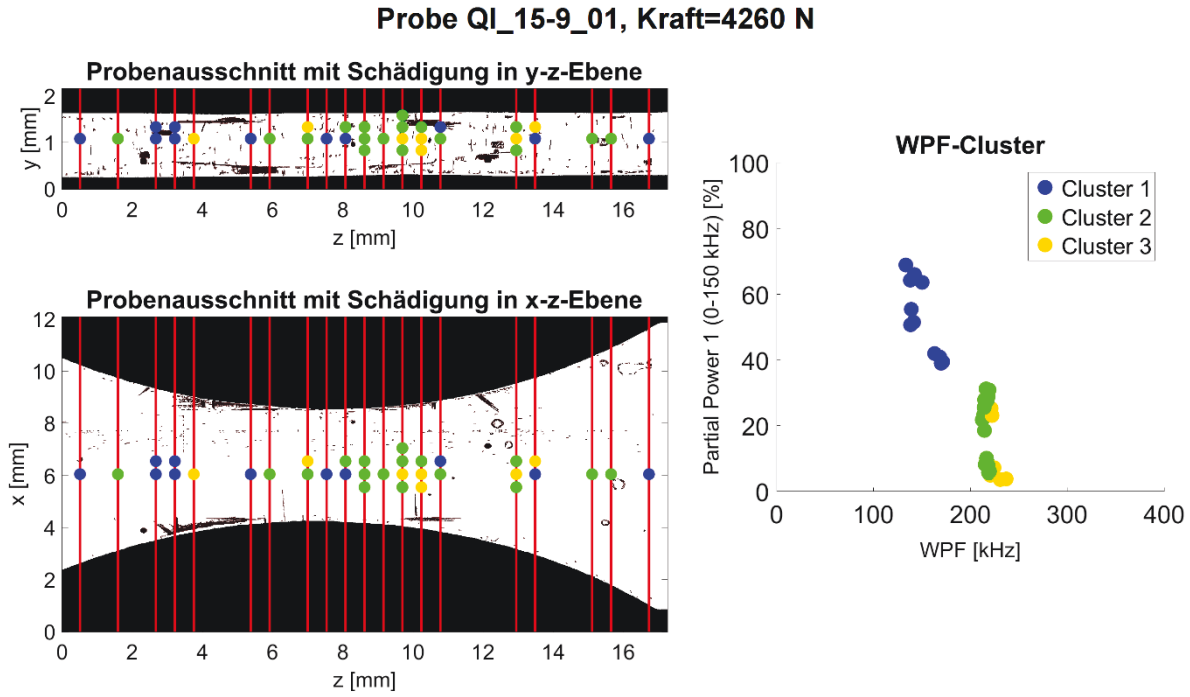
Anhang Abbildung 48 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4759 N



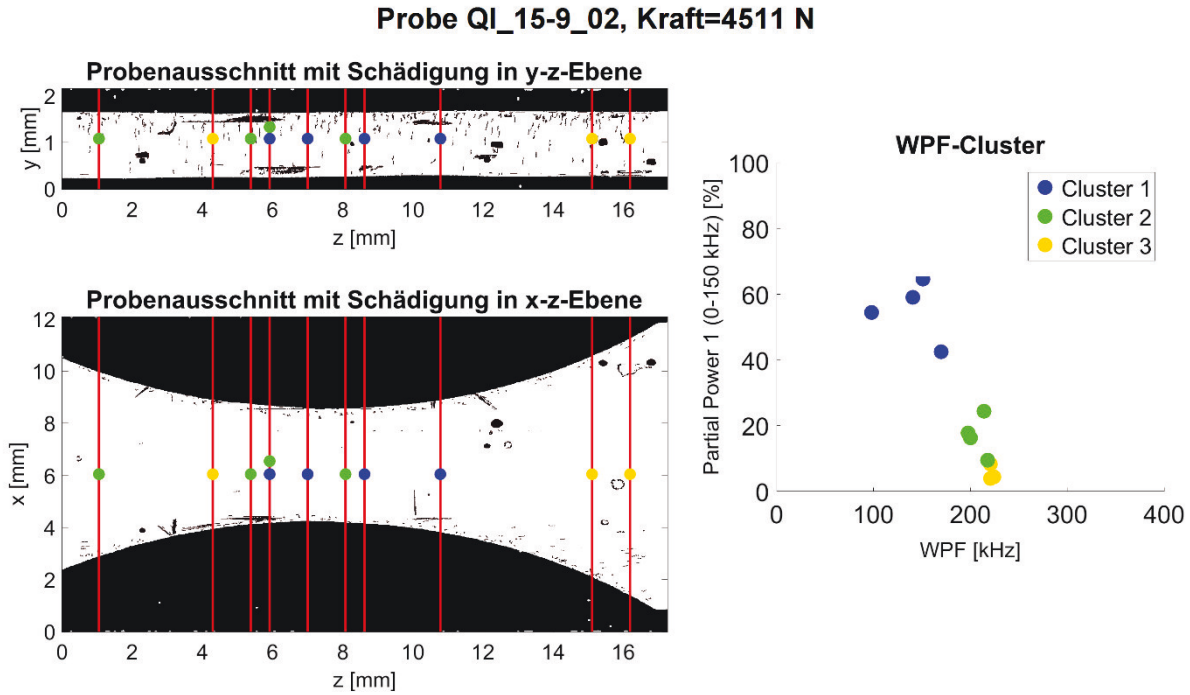
Anhang Abbildung 49 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 5009 N



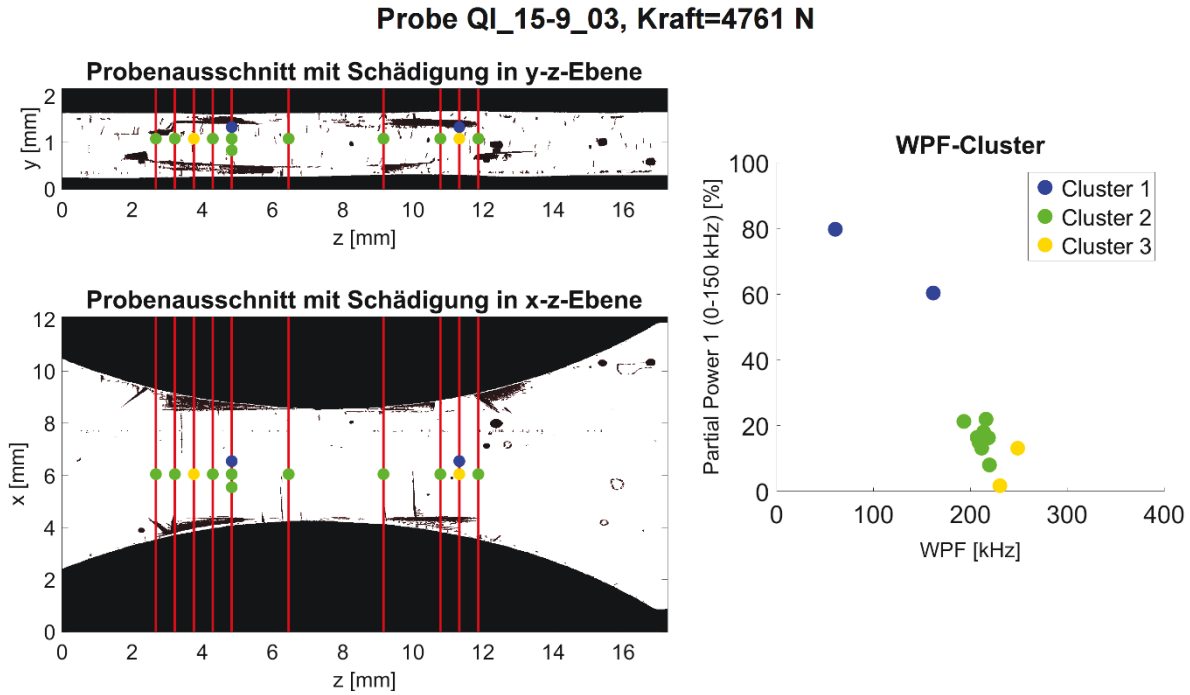
Anhang Abbildung 50 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 5262 N



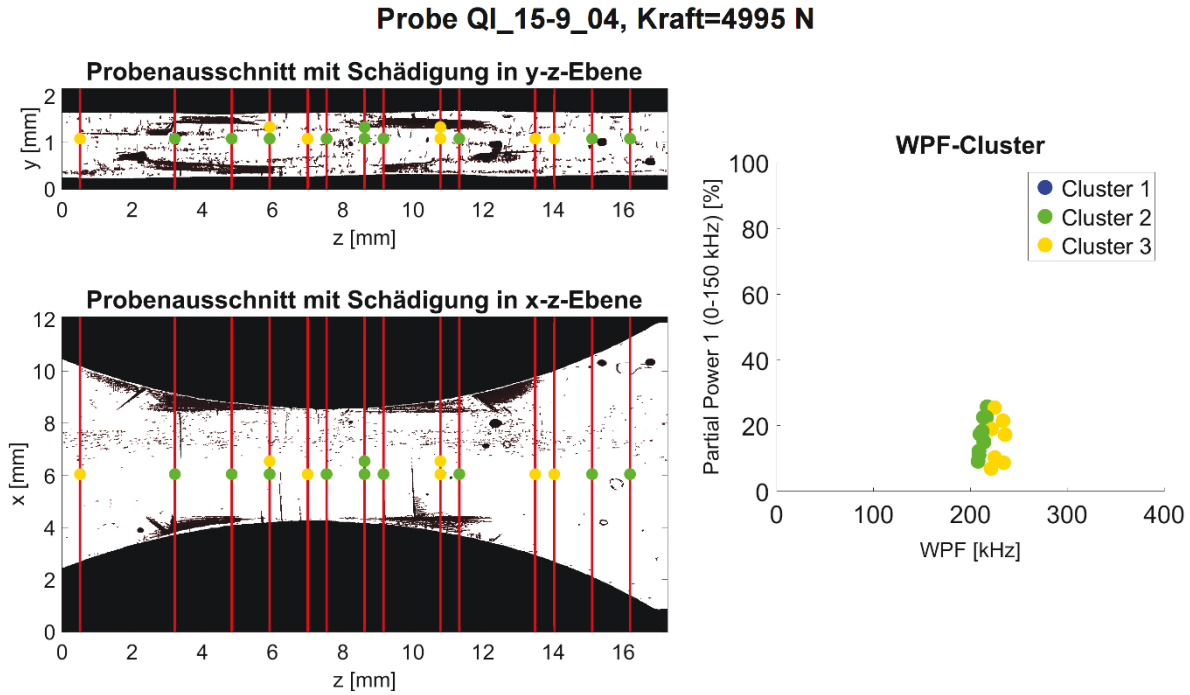
Anhang Abbildung 51 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4260 N



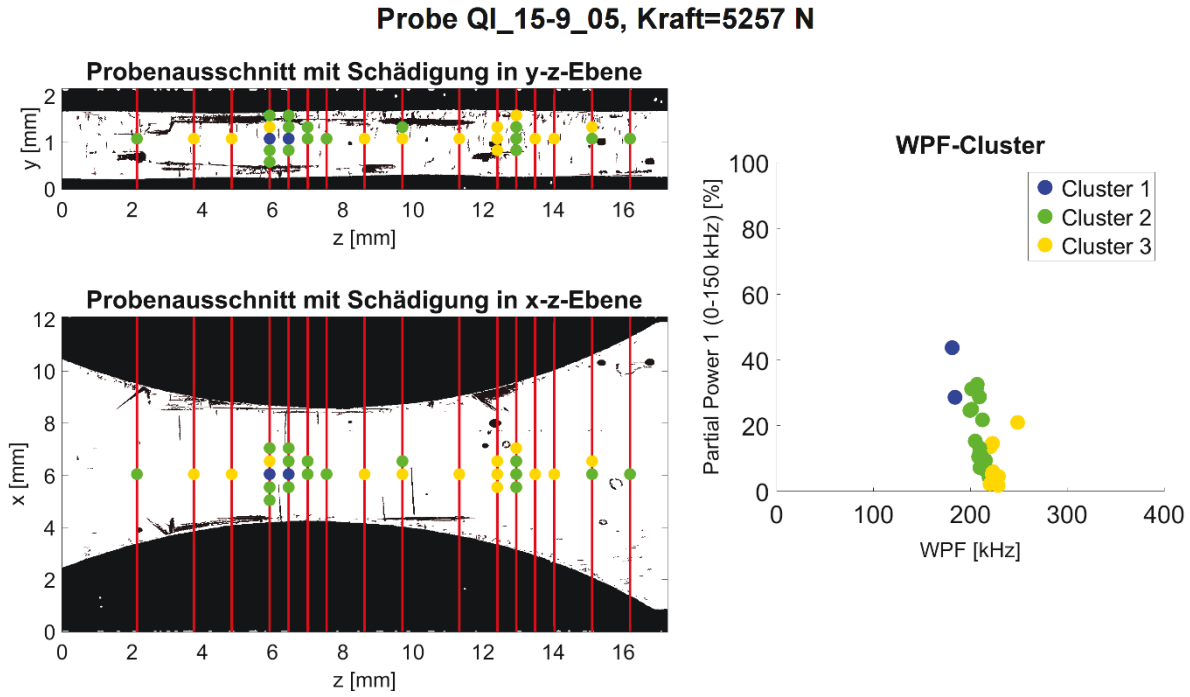
Anhang Abbildung 52 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4511 N



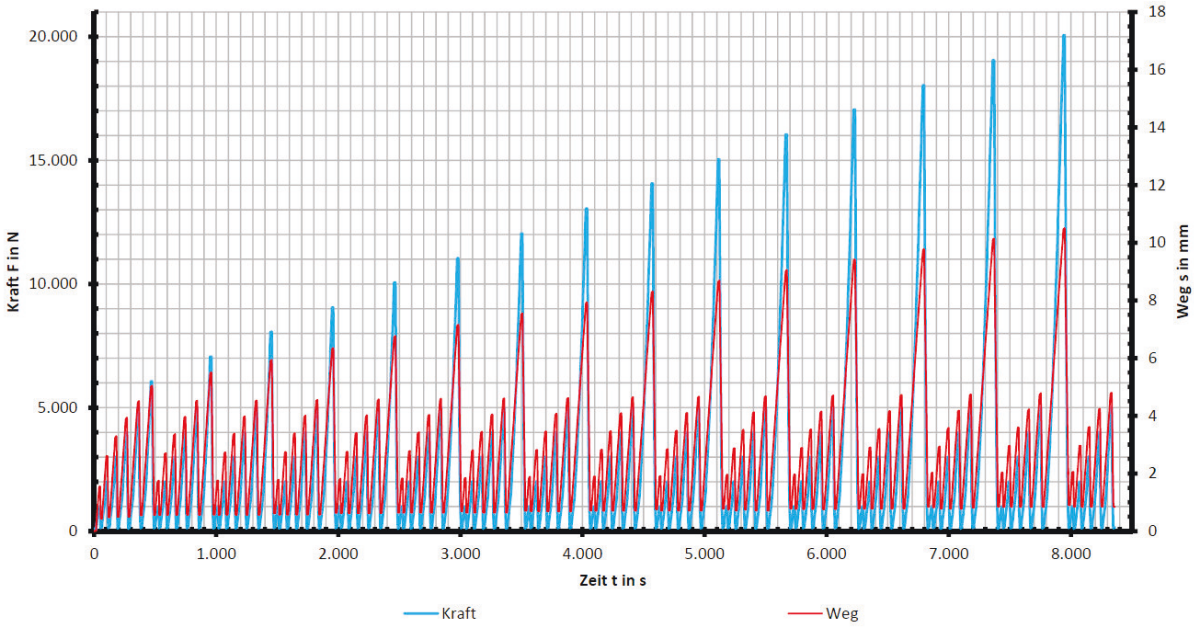
Anhang Abbildung 53 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4761 N



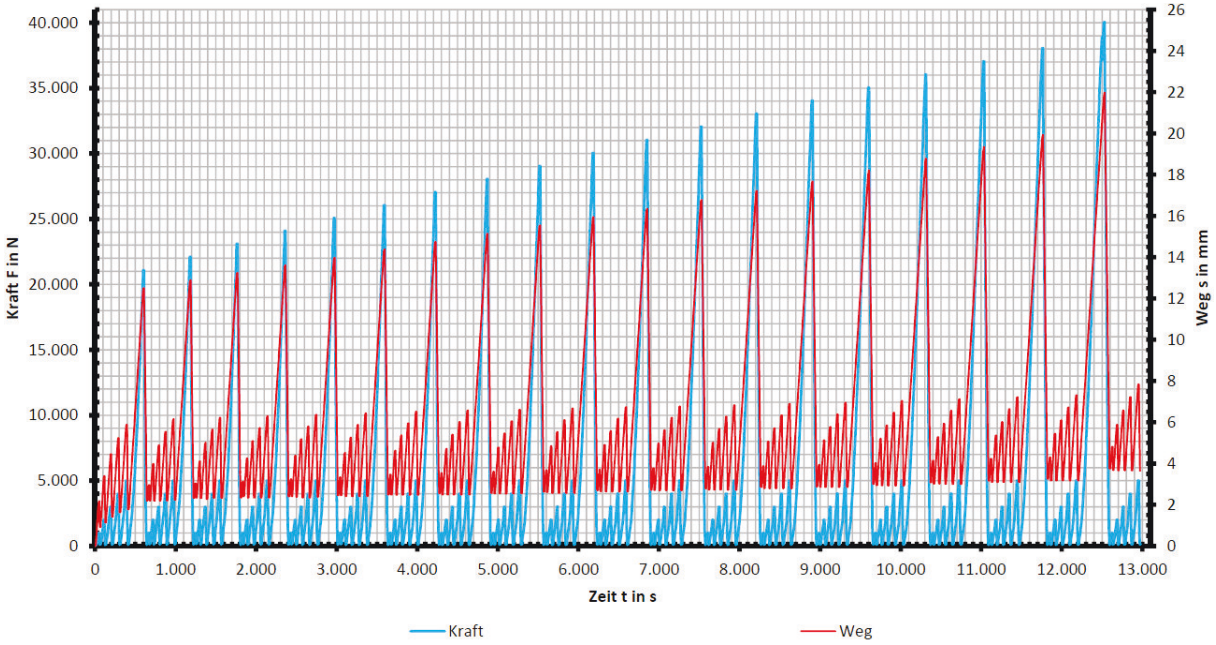
Anhang Abbildung 54 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 4995 N



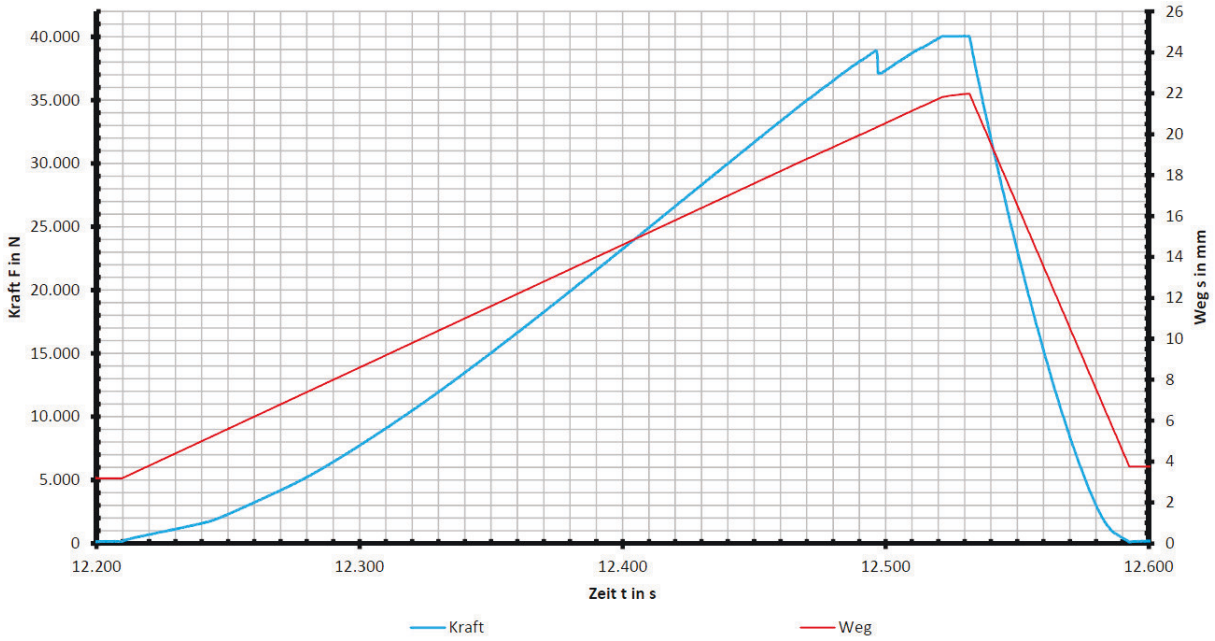
Anhang Abbildung 55 CT-Untersuchung einer quasiisotropen Probe bei einer Zugbelastung von 5257 N



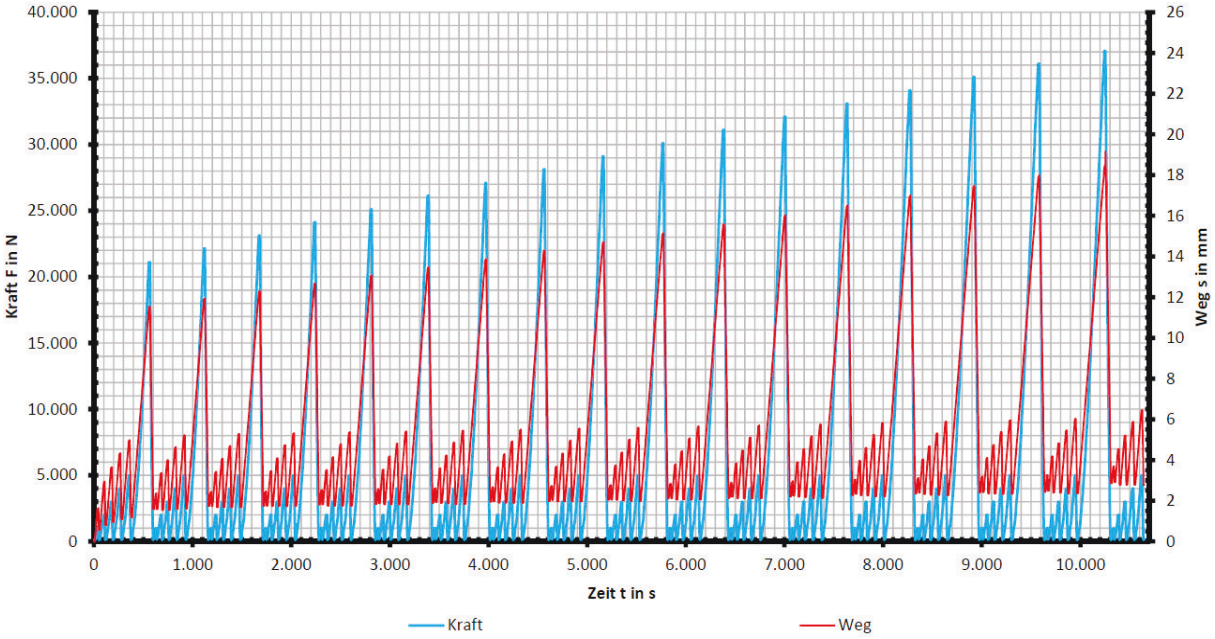
Anhang Abbildung 56 Messbeispiel der Kraft-Weg-Verläufe die mit dem Schallemissionsmesssystem als analoge Prozesssignale an der ZWICK-Prüfmaschine abgegriffen wurden; Lasteintrag Speichen 5, 2 und 8 alternierend: Proof-Load Zyklen 1 kN – 5 kN Load-Zyklen mit Laststeigerung 6 kN – 20 kN



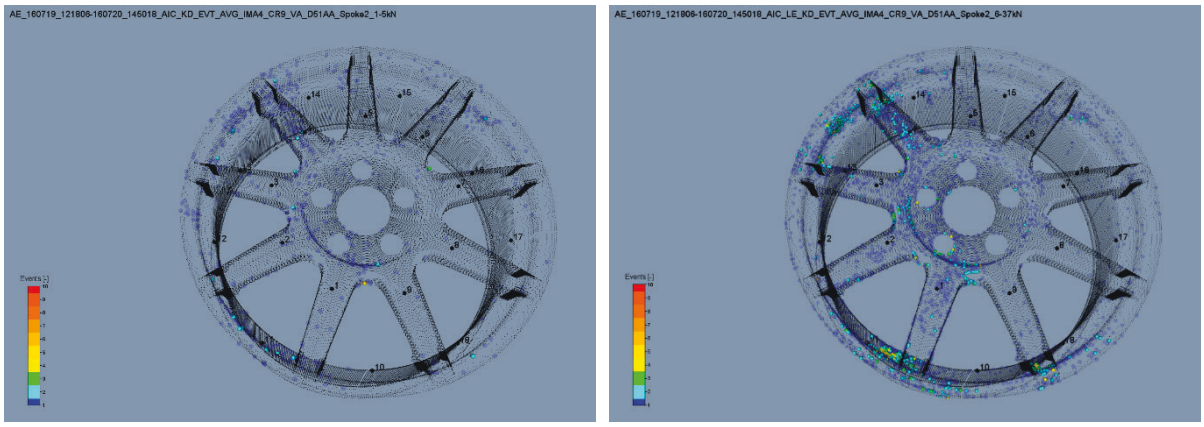
Anhang Abbildung 57 Messbeispiel der Kraft-Weg-Verläufe die mit dem Schallemissionsmesssystem als analoge Prozesssignale an der ZWICK-Prüfmaschine abgegriffen wurden; Lasteintrag Speiche 5 alternierend: Proof-Load Zyklen1 kN – 5 kN Load-Zyklen mit Laststeigerung 21 kN – 40 kN



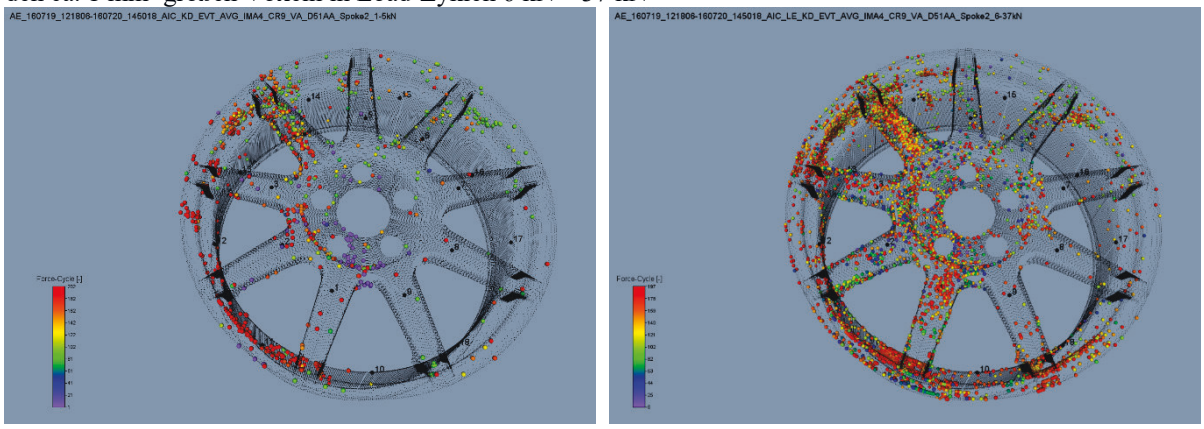
Anhang Abbildung 58 Messbeispiel für letzten Lastzyklus; Kraft/Weg-Zeit-Diagramm



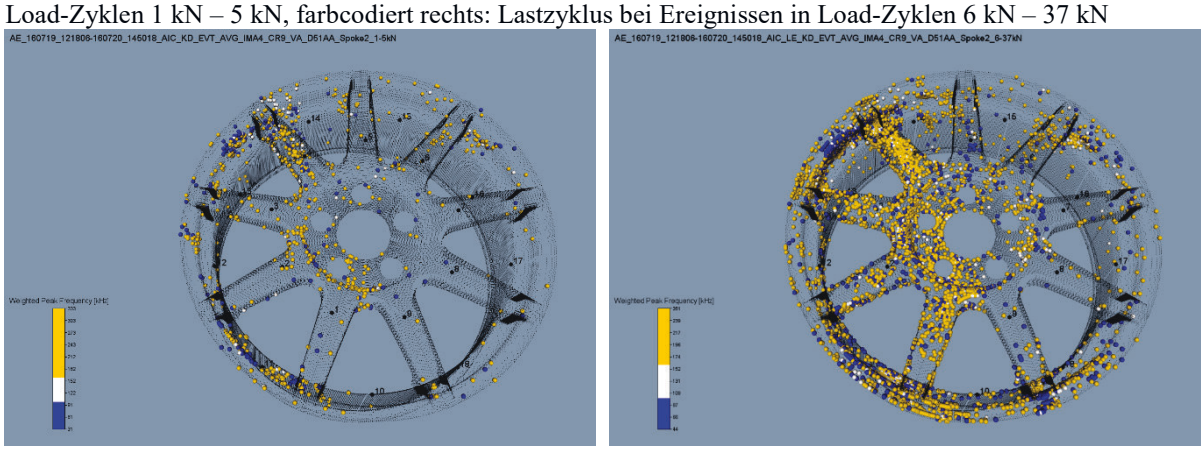
Anhang Abbildung 59 Messbeispiel der Kraft-Weg-Verläufe die mit dem Schallemissionsmesssystem als analoge Prozesssignale an der Zwick-Prüfmaschine abgegriffen wurden; Lasteintrag Speiche 2 alternierend: Proof-Load Zyklen 1 kN – 5 kN Load-Zyklen mit Laststeigerung 21 kN – 37 kN



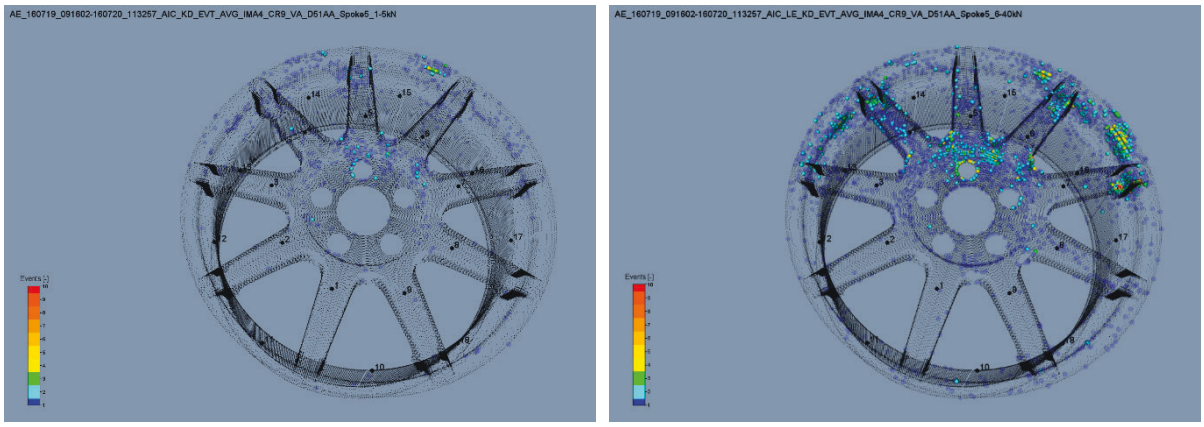
Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln in Load-Zyklen 6 kN – 37 kN



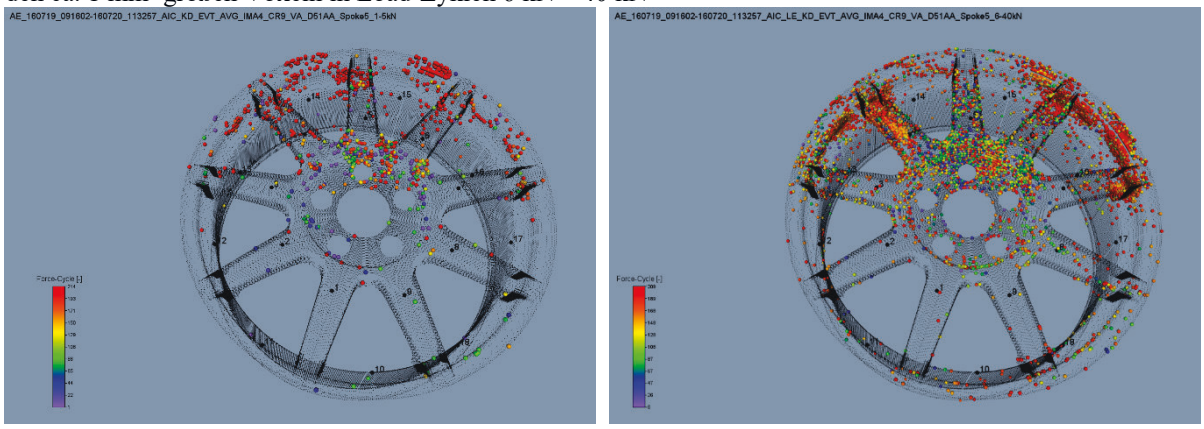
Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, farbcodiert links: Lastzyklus bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Lastzyklus bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 37 kN



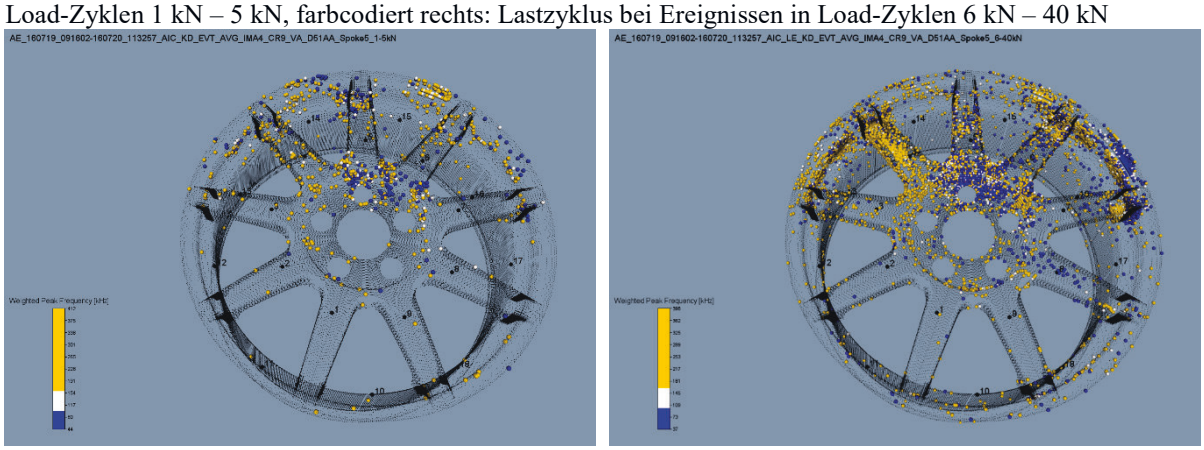
Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, farbcodiert links: Weighted Peak Frequency bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: WPF bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 37 kN



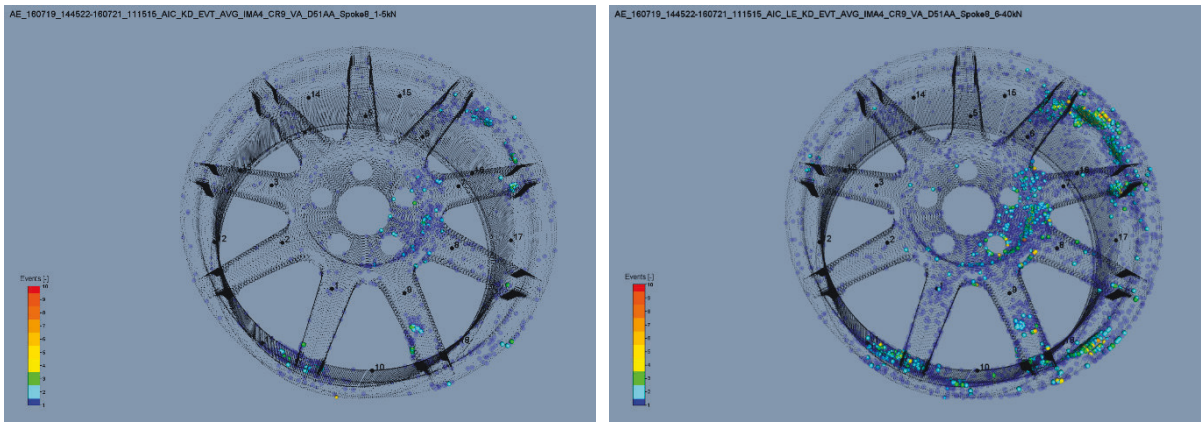
Lasteintrag Speiche 5: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln in Load-Zyklen 6 kN – 40 kN



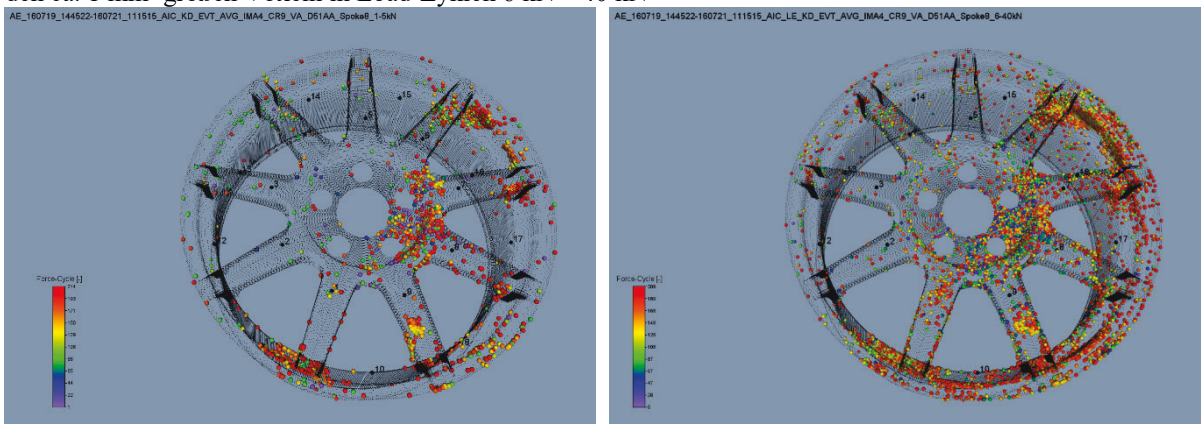
Lasteintrag Speiche 5: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Lastzyklus bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Lastzyklus bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 40 kN



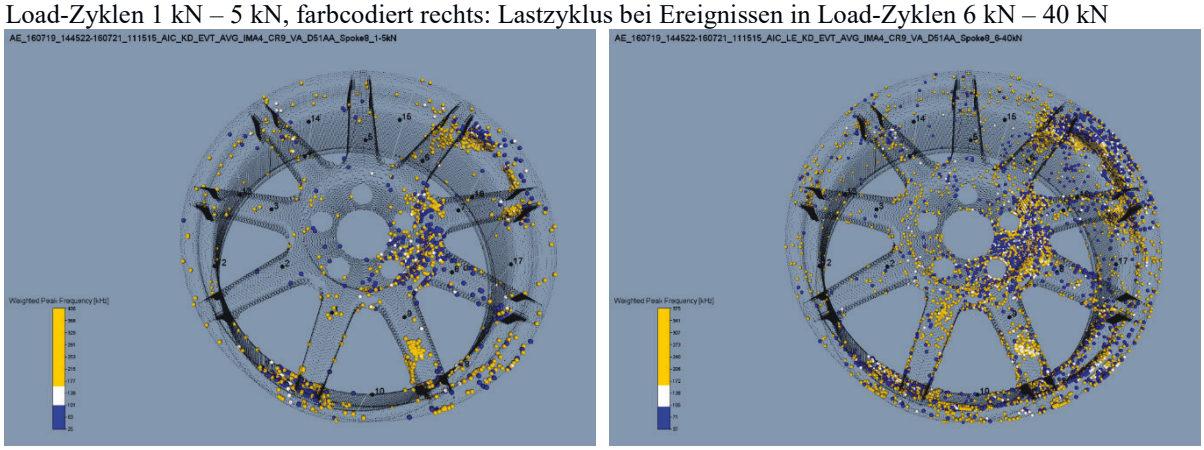
Lasteintrag Speiche 5: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Weighted Peak Frequency bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: WPF bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 40 kN



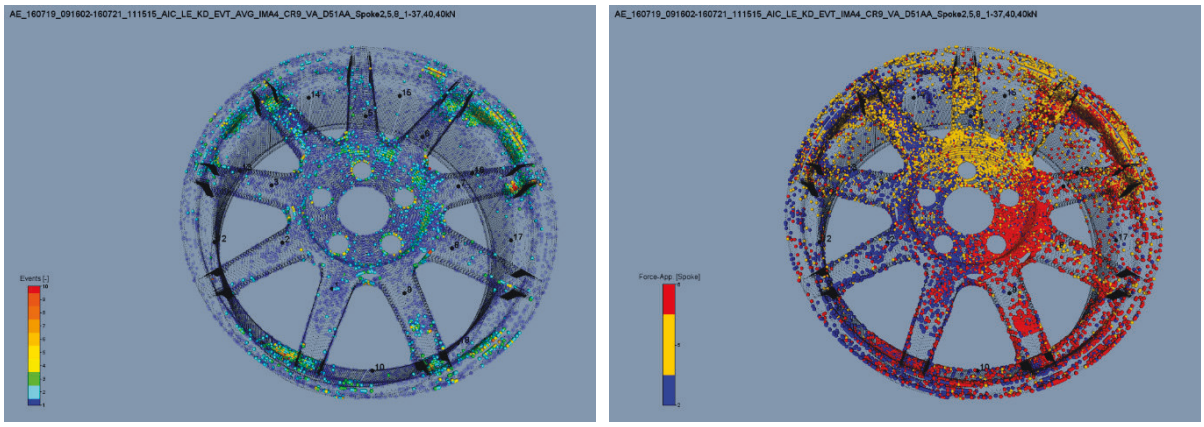
Lasteintrag Speiche 8: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln in Load-Zyklen 6 kN – 40 kN



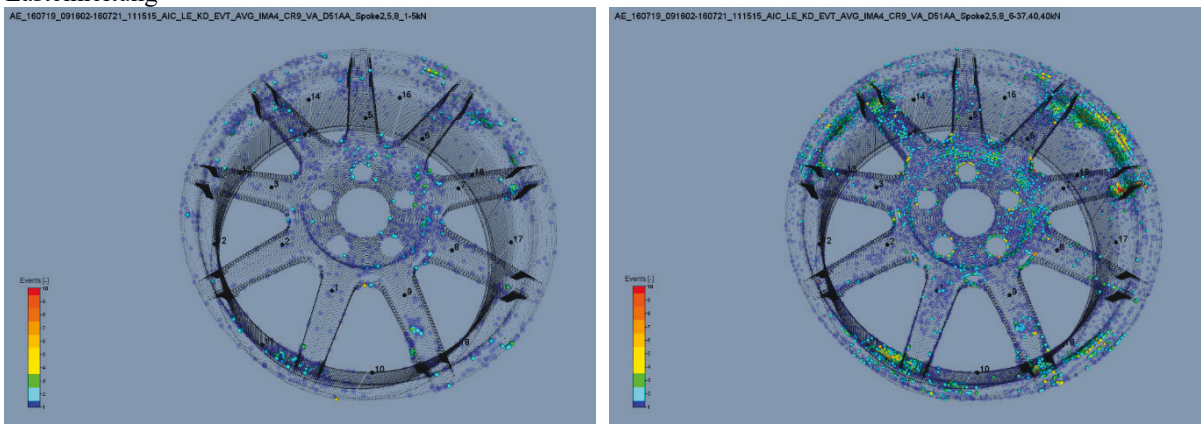
Lasteintrag Speiche 8: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Lastzyklus bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Lastzyklus bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 40 kN



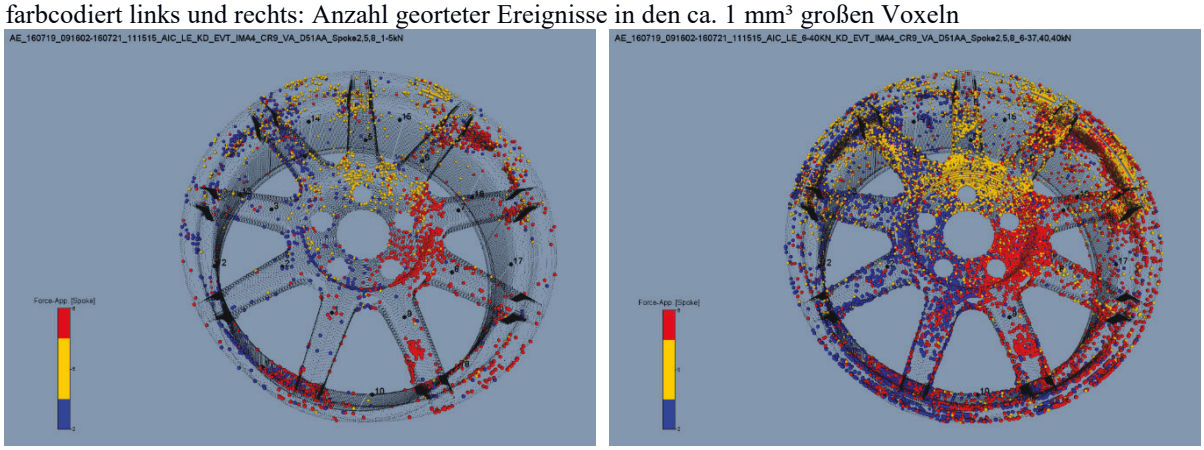
Lasteintrag Speiche 8: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Weighted Peak Frequency bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: WPF bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 40 kN



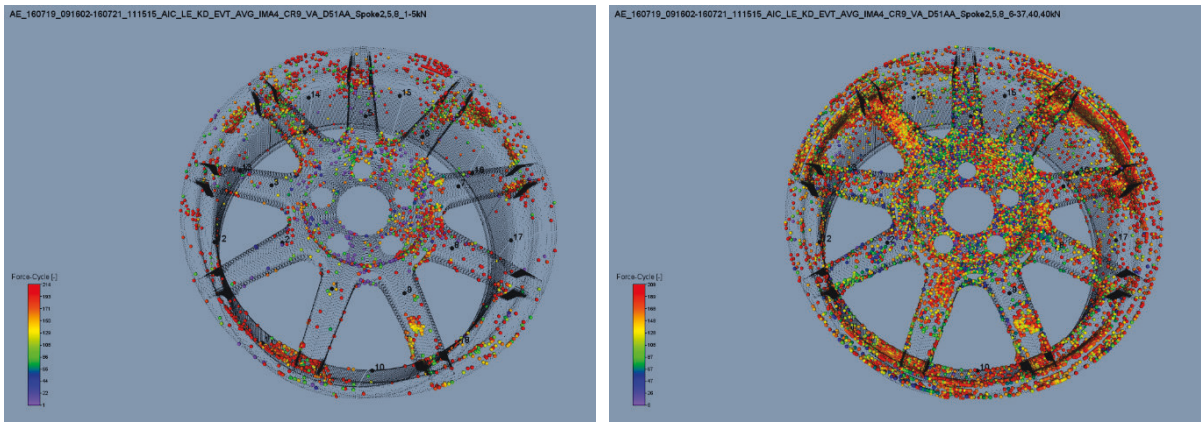
Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, LE an Speichen 5 und 8: 1 kN - 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln, farbcodiert rechts: Lasteinleitung



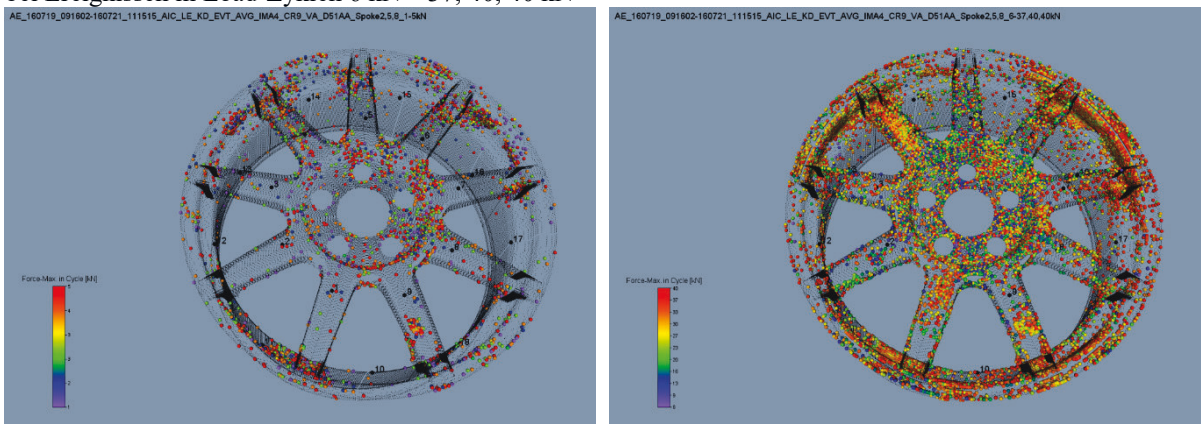
Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, LE an Speichen 5 und 8: 1 kN - 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links und rechts: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln



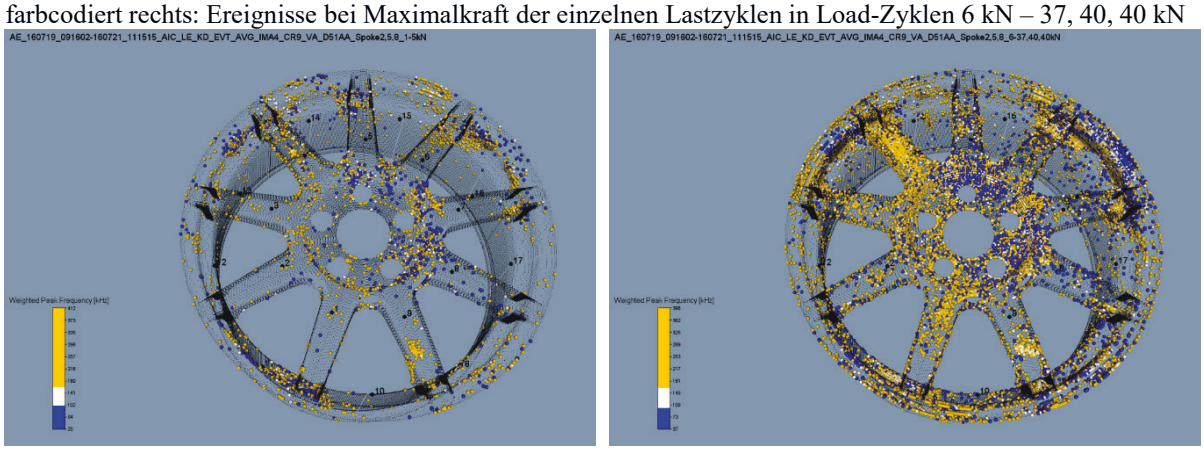
Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, LE an Speichen 5 und 8: 1 kN - 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Lasteinleitung bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Lasteinleitung bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 37, 40, 40 kN



Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, LE an Speichen 5 und 8: 1 kN - 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Lastzyklus bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Lastzyklus bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 37, 40, 40 kN

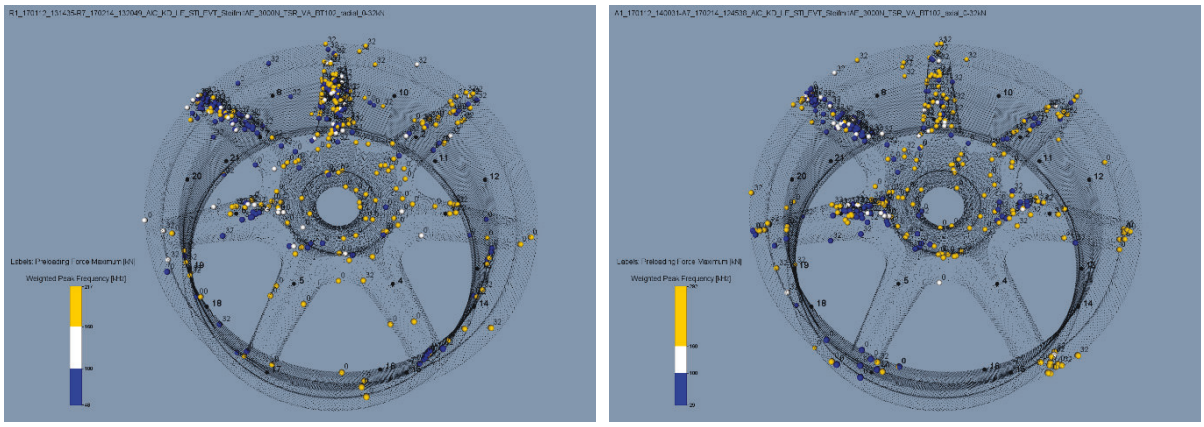


Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, LE an Speichen 5 und 8: 1 kN - 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Ereignisse bei Maximalkraft der einzelnen Lastzyklen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: Ereignisse bei Maximalkraft der einzelnen Lastzyklen in Load-Zyklen 6 kN – 37, 40, 40 kN

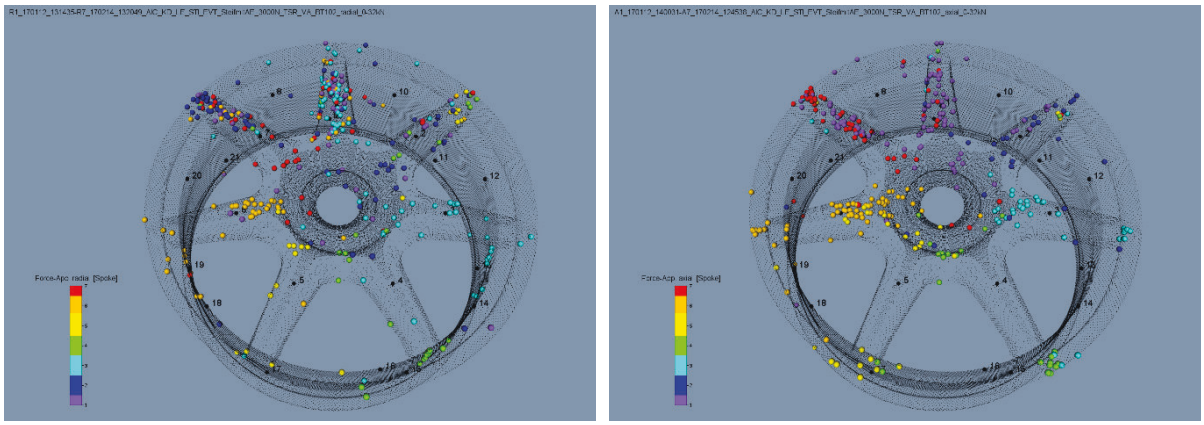


Lasteintrag Speiche 2: 1 kN – 20 kN, 21 kN – 37 kN, LE an Speichen 5 und 8: 1 kN - 20 kN, 21 kN – 40 kN, farbcodiert links: Weighted Peak Frequency bei Ereignissen in Proof-Load-Zyklen 1 kN – 5 kN, farbcodiert rechts: WPF bei Ereignissen in Load-Zyklen 6 kN – 37, 40, 40 kN

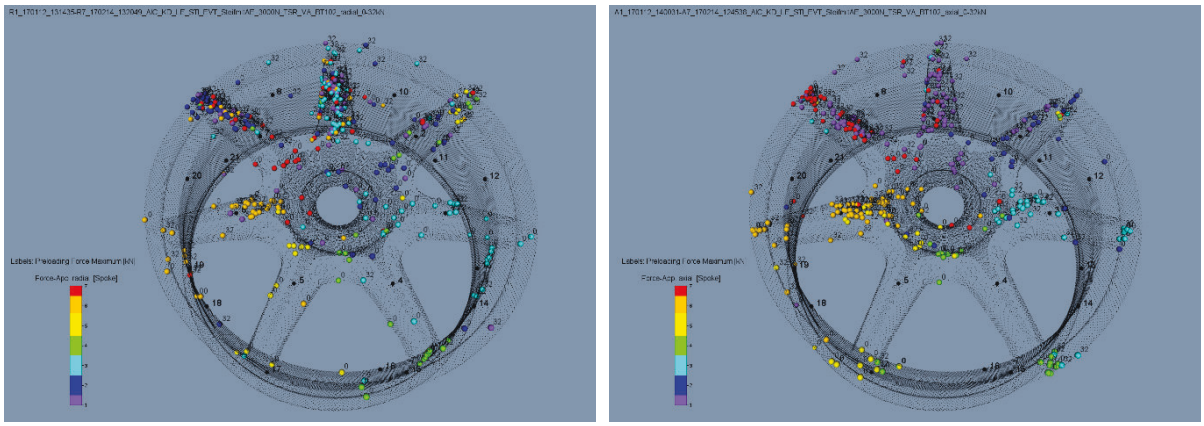
Anhang Tabelle 12 Exemplarische Darstellungen der Ergebnisse eines gesamten Versuchsregimes für die Schallemissionsanalyse während quasi-statischer Belastungstests an einem rotationssymmetrischen Demonstratorbauteil (CFK-Rad) mit unterschiedlichen Parameterdarstellungen



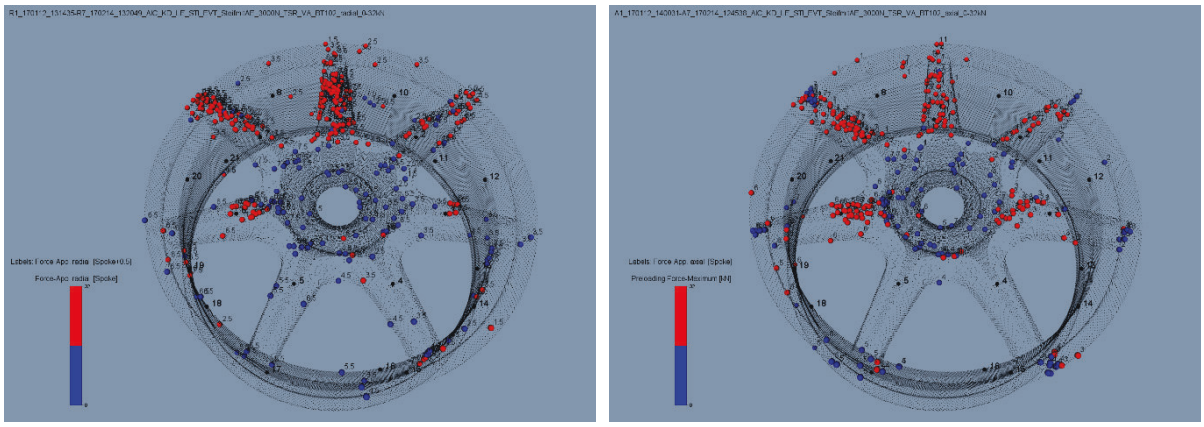
Farbcodierte Darstellung: Weighted Peak Frequency bei AE-Ereignissen in Zyklen 1–3 kN nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, radial und axial, Label: Vorbelastungsstufen an der ZWICK, radial und axial



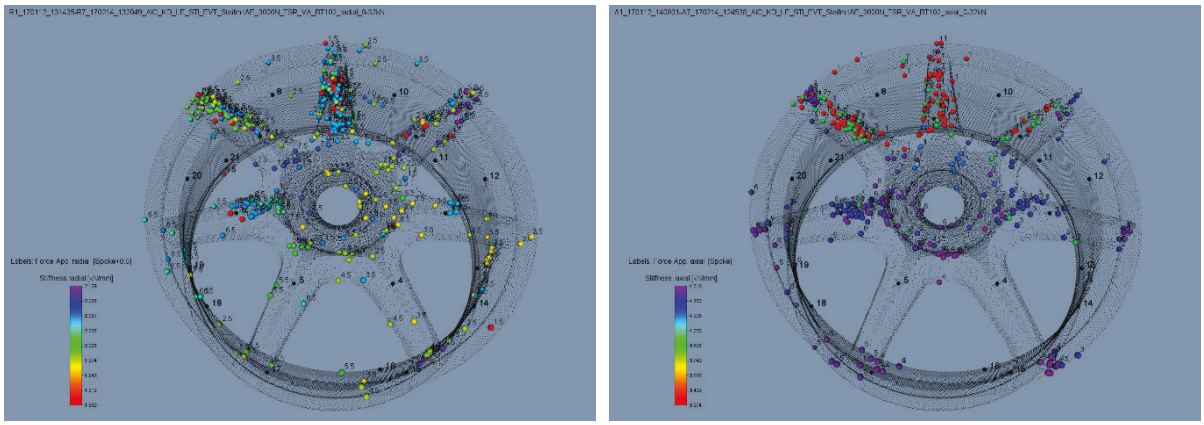
Farbcodierte Darstellungen: AE-Ereignisse entsprechend der Lasteinleitung in Zyklen 1–3 kN nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, , radial und axial



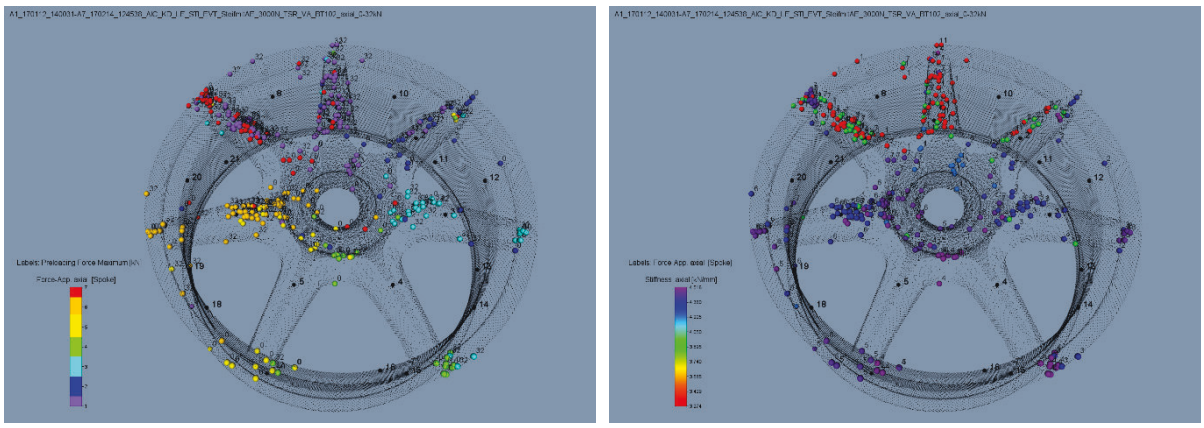
Farbcodierte Darstellung: AE-Ereignisse entsprechend der Lasteinleitung in Zyklen 1–3 kN nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, Label: Vorbelastungsstufen an der ZWICK, radial und axial



Farbcodierte Darstellungen: AE-Ereignisse entsprechend der Vorbelastungen in Zyklen 1–3 kN nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, Label: radiale und axiale Lasteinleitung am Steifigkeitsprüfstand

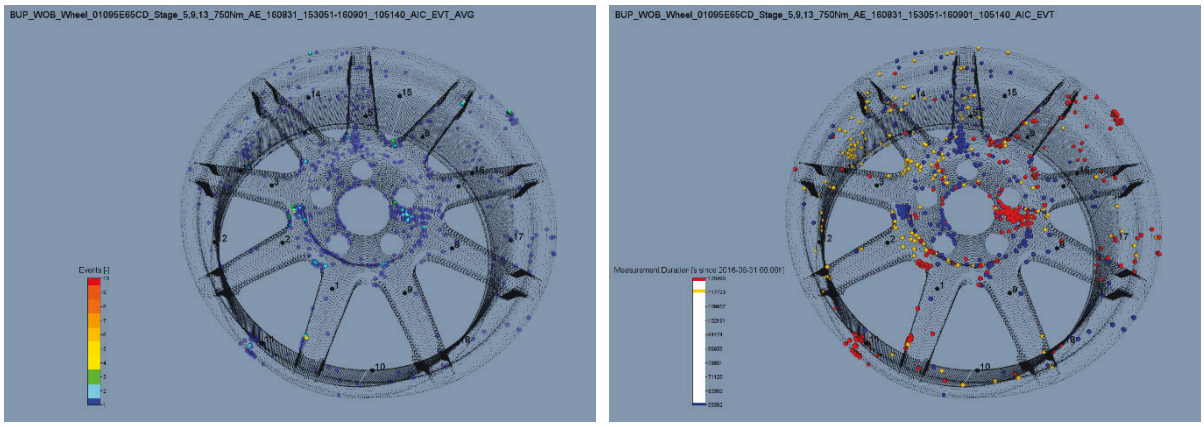


Farbcodierte Darstellung: AE-Ereignisse mit Steifigkeitswerten der Lasteinleitung [kN/mm] nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, Label: radiale und axiale Lasteinleitung am Steifigkeitsprüfstand

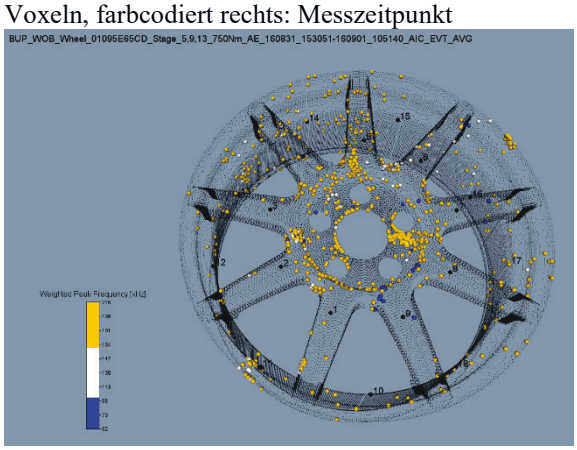


Farbcodiert links: AE-Ereignisse entsprechend der Lasteinleitung in Zyklen 1–3 kN nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, Label: Vorbelastungsstufen
Farbcodiert rechts: AE-Ereignisse mit Steifigkeitswerten der Lasteinleitung [kN/mm] in Zyklen 1–3 kN nach unterschiedlichen Vorbelastungsstufen an der ZWICK, Label: axiale Lasteinleitung am Steifigkeitsprüfstand

Anhang Tabelle 13 Exemplarische Darstellungen verschiedener Parameter der Schallemissionsmessung auf dem Steifigkeitsprüfstand nach schädigenden Zyklen auf der Universalprüfmaschine eines CFK-Rades

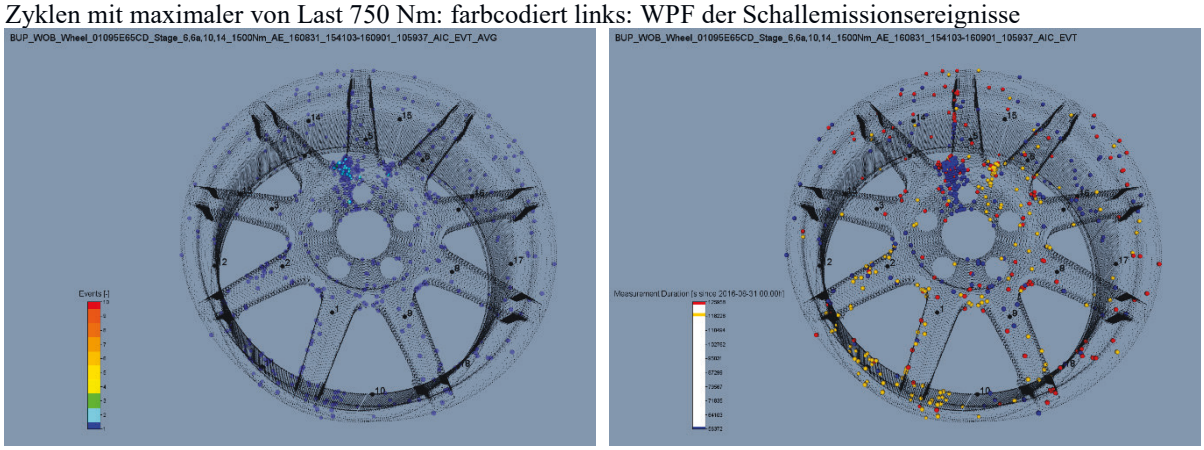


Zyklen mit maximaler von Last 750 Nm: farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln, farbcodiert rechts: Messzeitpunkt

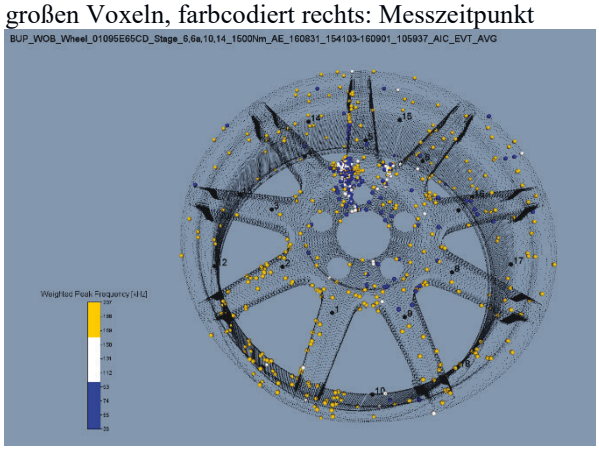


- bei 750 Nm scheint eine gleichmäßigere Anregung der Zonen stattzufinden

Zyklen mit maximaler von Last 750 Nm: farbcodiert links: WPF der Schallemissionsereignisse

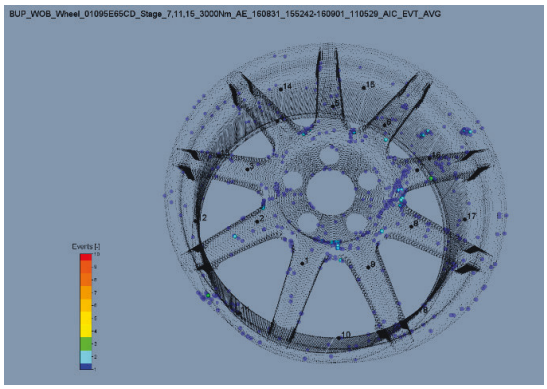


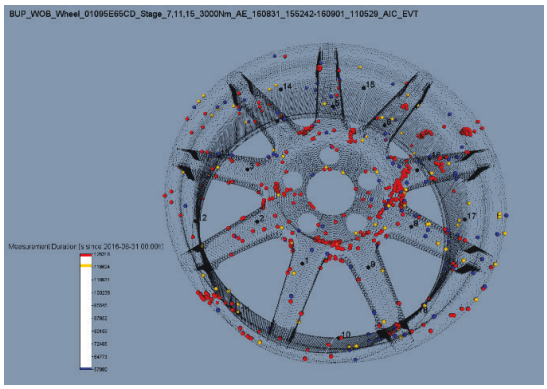
Zyklen mit maximaler von Last 1500 Nm: farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln, farbcodiert rechts: Messzeitpunkt



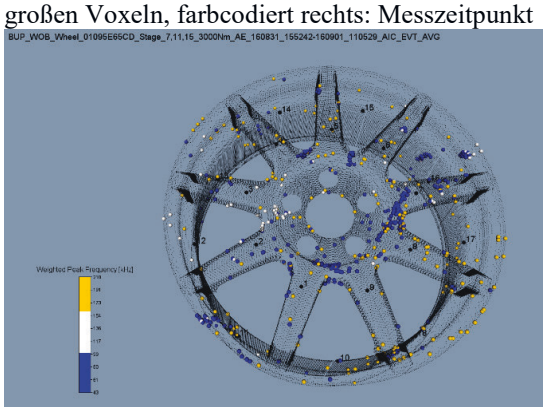
- bei 1500 Nm keine gleichmäßigere Anregung der Zonen
- weniger Schallemissionsaktivität als bei halb so hohem Prüfmoment (750 Nm)

Zyklen mit maximaler von Last 1500 Nm: farbcodiert links: WPF der Schallemissionsereignisse



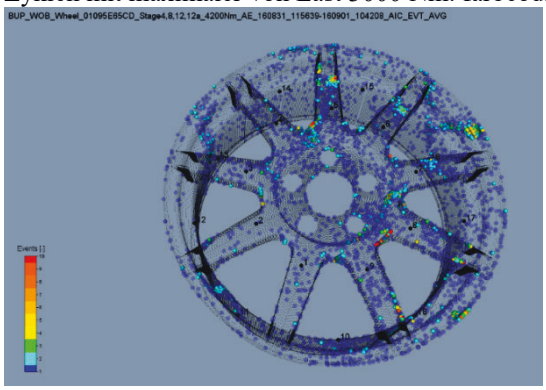


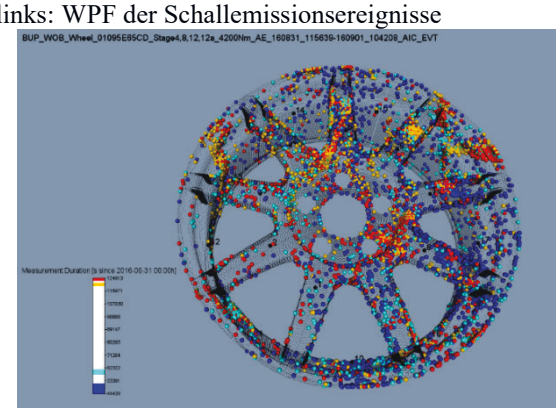
Zyklen mit maximaler von Last 3000 Nm: farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln, farbcodiert rechts: Messzeitpunkt



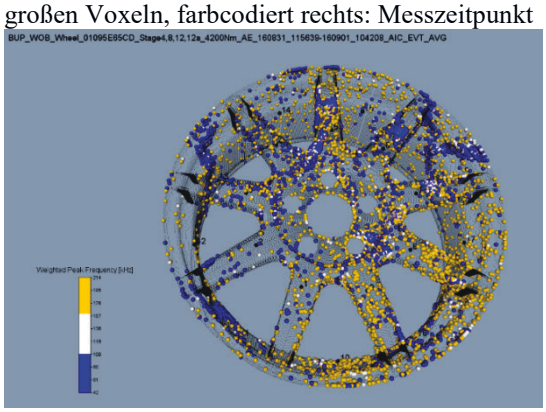
- bei 3000 Nm keine gleichmäßigere Anregung der Zonen
- weniger Schallemissionsaktivität als bei einem Prüfmoment von 750 Nm und 1500 Nm

Zyklen mit maximaler von Last 3000 Nm: farbcodiert links: WPF der Schallemissionsereignisse





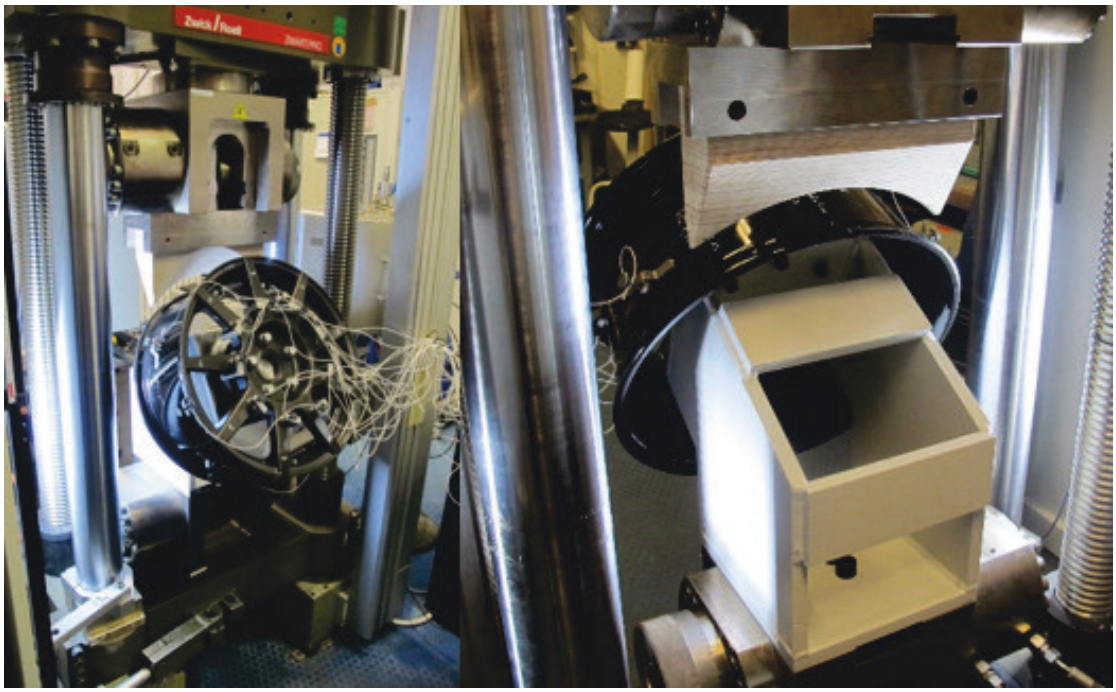
Zyklen mit maximaler von Last 4200 Nm: farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm³ großen Voxeln, farbcodiert rechts: Messzeitpunkt



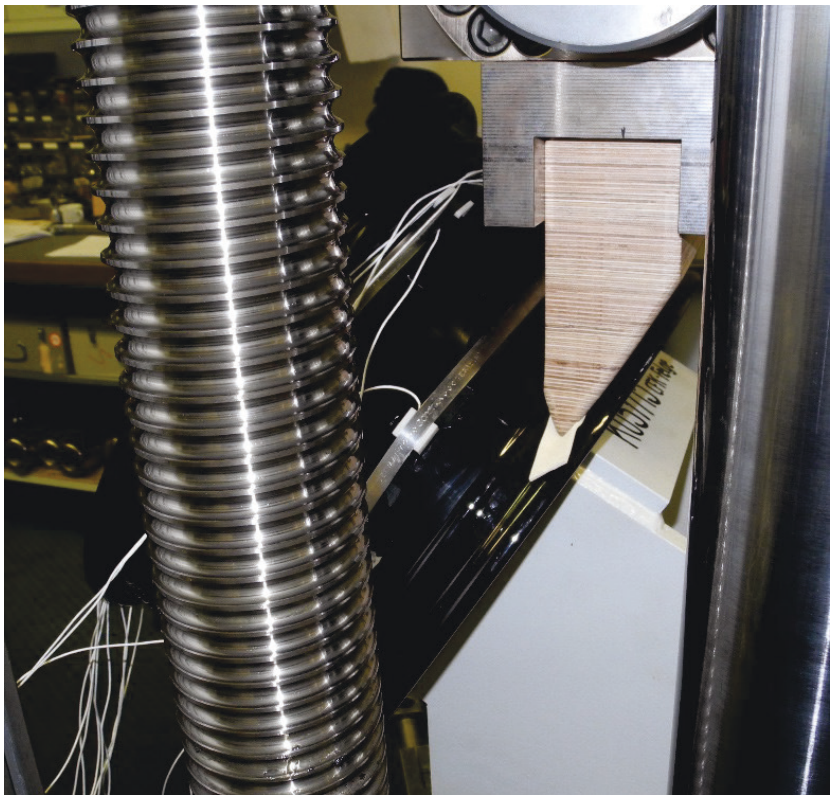
- bei 4200 Nm gleichmäßige Anregung der Zonen
- viel Schallemissionsaktivität während Prüfung bei belastenden Momenten
- Identifikation der Schädigungsbereiche während BUP möglich
- Identifikation von neuen und alten Schäden bei weiterer Momentenbeaufschlagung möglich

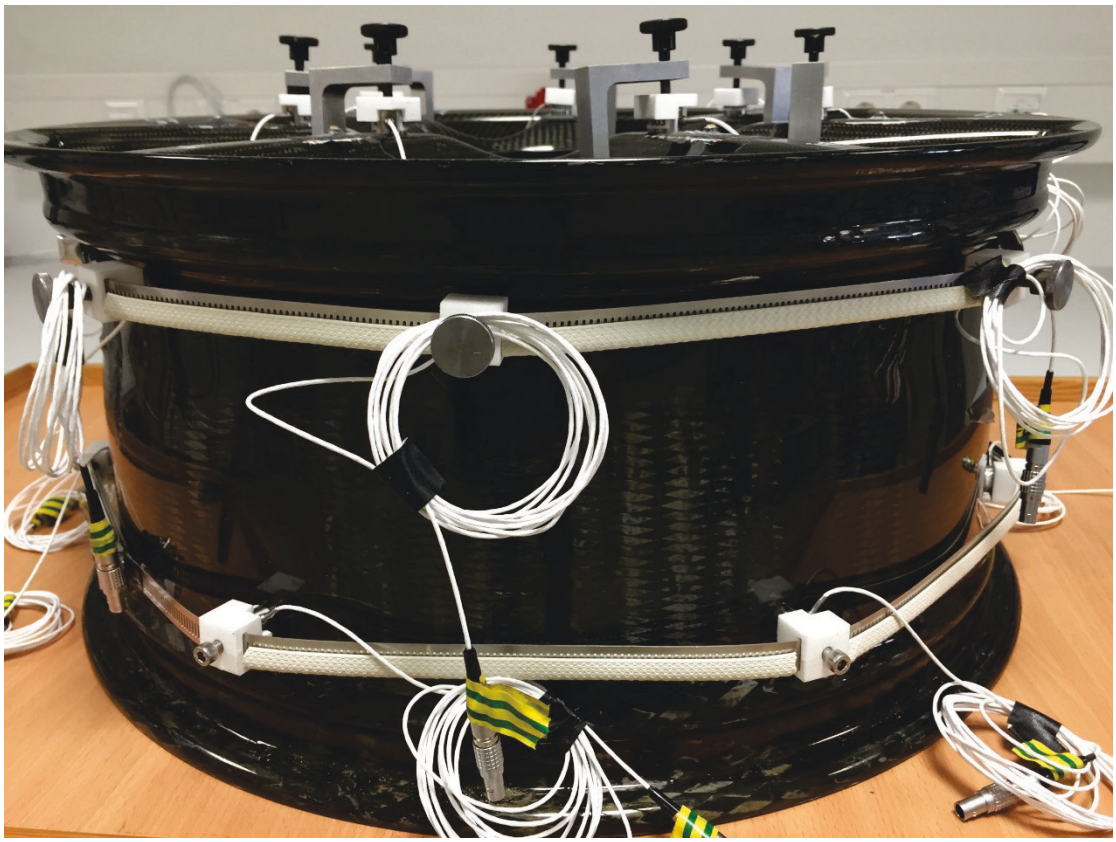
Zyklen mit maximaler von Last 4200 Nm: farbcodiert links: WPF der Schallemissionsereignisse

Anhang Tabelle 14 Exemplarische Darstellungen der Ergebnisse einer gesamten Messreihe für die Schallemissionsanalyse während der BUP an einem rotationssymmetrischen Demonstratorbauteil (CFK-Rad) mit unterschiedlichen Parameterdarstellungen für unterschiedliche Belastungsmomente

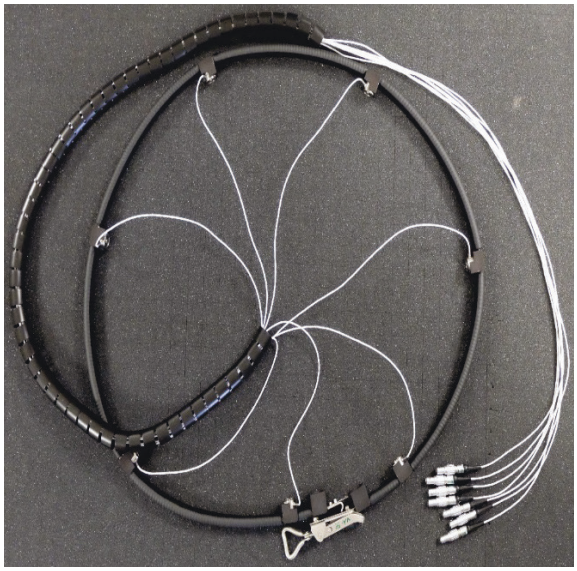


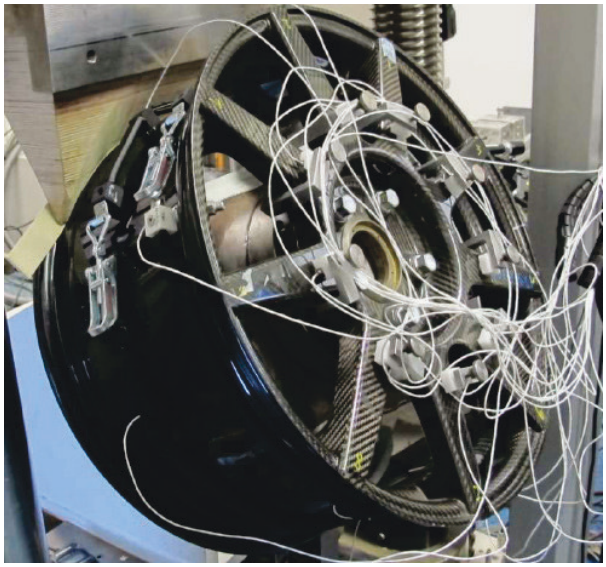
Montiertes und instrumentiertes Demonstratorbauteil auf Universalprüfmaschine


Befestigung der AE-Sensoren im Felgenbettbereich mit Bandimex und neuen Sensorkappen (POM)



Sensorjochs Speichenbereich gleichbleibend; Sensorgürtel bestehend aus: Federstahlband mit „Schraubverschluss“, Kantenschutzgummi als Isolierung und neuen Sensorkappen für AE-Sensoren mit fixen Positionen auf der Struktur





Neue Gürtelkomponenten: Gürtelring aus Federbandstahl mit 12 mm Breite und 0,5mm Dicke; Sensorkopfstücke gefertigt über 3D-Druck aus Polyamid (PA2200) über Selektives Lasersintern (SLS); Kantenschutzgummi über dem Federbandstahl zwischen den Sensorkopfstücken; Spannverschluss und Gegenhaken als Verschlusssystem

Anhang Tabelle 15 Entwicklung Sensorapplikationsvarianten für Räder

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564	
Auftragsnummer:	WLA-201604676	Bestimmungsverfahren:	B	
Auftraggeber:	IKTS	Probenanzahl:	3	
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-510	Projektnummer:	externer Auftrag	
Kunde:	Herr Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00	
Prüfdatum:	08.11.2016	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02	4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	FAUF:1397028	
Prüftemperatur:	23,8°C	Probendichte:	-	
rel. Luftfeuchte:	46,10%	Konditionierung soll *(ist)*:	>2h bei 23±2°C/50±5%	(3d bei 23±2°C/50±5%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)*:	>45min bei 120°C;	(2h bei 130°C)
Messmittel:	PM810	Anforderung Ψ_F [%]:		
Prüfmittel:	PM131	Ψ_H [%]:		
Kalibriert bis:	Nov 17	Φ_F [%]:		
Prüfsoftware:	-	Φ_H [%]:		
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200	

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,16	1,15	1,15	1,15
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,3444	49,1689	48,7672	48,7602
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,3651	0,3642	0,3614	0,3636
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	48,5823	49,4054	48,9908	48,9928
Fasermasse	m_F [g]	0,2379	0,2365	0,2236	0,2326
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,573	1,578	1,575	1,58
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	65,17	64,93	61,86	64,0
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	34,83	35,07	38,14	36,0
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	57,27	57,24	54,43	56,3
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	41,83	42,25	45,85	43,3

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			08.11.2016	CTS 06
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564	
Auftragsnummer:	WLA-201604678	Bestimmungsverfahren:	B	
Auftraggeber:	IKTS	Probenanzahl:	3	
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-510	Projektnummer:	externer Auftrag	
Kunde:	Herr Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00	
Prüfdatum:	08.11.2016	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02	4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	FAUF:1397031	
Prüftemperatur:	23,8°C	Probendichte:	-	
rel. Luftfeuchte:	46,10%	Konditionierung soll *(ist)*:	>2h bei 23±2°C/50±5%	(3d bei 23±2°C/50±5%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)*:	>45min bei 120°C;	(2h bei 130°C)
Messmittel:	PM810	Anforderung Ψ_F [%]:		
Prüfmittel:	PM131	Ψ_H [%]:		
Kalibriert bis:	Nov 17	Φ_F [%]:		
Prüfsoftware:	-	Φ_H [%]:		
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200	

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,08	1,10	1,10	1,09
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,9831	47,7079	49,1780	48,6230
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,3156	0,3188	0,3228	0,3191
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	49,2177	47,9418	49,4154	48,8583
Fasermasse	m_F [g]	0,2347	0,2339	0,2374	0,2353
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,618	1,612	1,612	1,61
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	74,35	73,37	73,54	73,8
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	25,65	26,63	26,46	26,2
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	67,21	66,08	66,23	66,5
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	31,68	32,77	32,56	32,3

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			08.11.2016	CTS 06
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

WW

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL

Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

1/1

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564	
Auftragsnummer:	WLA-201604674	Bestimmungsverfahren:	B	
Auftraggeber:	IKTS	Probenanzahl:	3	
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-510	Projektnummer:	externer Auftrag	
Kunde:	Herr Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00	
Prüfdatum:	08.11.2016	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02	4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	FAUF:1397030	
Prüftemperatur:	23,8°C	Probendichte:	-	
rel. Luftfeuchte:	46,10%	Konditionierung soll *(ist)*:	>2h bei 23±2°C/50±5%	(3d bei 23±2°C/50±5%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)*:	>45min bei 120°C;	(2h bei 130°C)
Messmittel:	PM810	Anforderung Ψ_F [%]:		
Prüfmittel:	PM131	Ψ_H [%]:		
Kalibriert bis:	Nov 17	Φ_F [%]:		
Prüfsoftware:	-	Φ_H [%]:		
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200	

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	0,98	0,99	1,00	0,99
Masse des Glasfiltertiegel	m2 [g]	49,0125	48,5833	48,6196	48,7384
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m1 [g]	0,2934	0,2952	0,2945	0,2944
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m3 [g]	49,2444	48,8169	48,8519	48,9711
Fasermasse	mF [g]	0,2319	0,2336	0,2324	0,2326
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,643	1,639	1,629	1,64
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	79,04	79,14	78,90	79,0
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	20,96	20,86	21,10	21,0
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	72,55	72,46	71,81	72,3
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	26,29	26,10	26,23	26,2

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			08.11.2016	CTS 06
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

FCPV-102-1 WLA-201604674 CTS 23 28.12.2015

Anhang Abbildung 60 Prüfprotokoll der Bestimmung des Faservolumengehaltes der Probenserien 73-77

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564	
Auftragsnummer:	WLA-201605235	Bestimmungsverfahren:	B	
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3	
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag	
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00	
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02	4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	0°/90° Lagenaufbau	
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-	
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5%	(15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C;	(2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:		
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:		
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64	
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:		
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200	

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,39	1,39	1,38	1,39
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,0904	48,5830	48,6188	48,4307
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,4152	0,3865	0,4028	0,4015
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	48,3999	48,8718	48,9197	48,7304
Fasermasse	m_F [g]	0,3094	0,2888	0,3009	0,2997
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,620	1,623	1,617	1,62
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	74,52	74,73	74,70	74,6
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	25,48	25,27	25,30	25,4
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	67,44	67,76	67,48	67,6
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	31,51	31,31	31,23	31,4

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:	JA	NEIN	06.01.2017 Datum	Unterschrift/Signum CTS 23

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564	
Auftragsnummer:	WLA-201605236	Bestimmungsverfahren:	B	
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3	
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag	
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00	
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02	4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	±45° Lagenaufbau	
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-	
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5%	(15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C;	(2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:		
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:		
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64	
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:		
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200	

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,48	1,38	1,37	1,41
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,3442	49,1687	48,7554	48,7561
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,4462	0,4017	0,4111	0,4197
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	48,6761	49,4663	49,0591	49,0672
Fasermasse	m_F [g]	0,3319	0,2976	0,3037	0,3111
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,626	1,621	1,613	1,62
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	74,39	74,09	73,87	74,1
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	25,61	25,91	26,13	25,9
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	67,58	67,10	66,56	67,1
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	31,79	32,06	32,18	32,0

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			06.01.2017	
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

CTS 22

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605237	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	quasiisotropher Lagenaufbau
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,39	1,40	1,40	1,40
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,9828	47,7074	49,1778	48,6227
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,4440	0,4397	0,4359	0,4399
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	49,3124	48,0347	49,4996	48,9489
Fasermasse	m_F [g]	0,3295	0,3273	0,3218	0,3262
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,603	1,621	1,618	1,61
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	74,22	74,42	73,84	74,2
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	25,78	25,58	26,16	25,8
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	66,46	67,40	66,74	66,9
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	31,55	31,65	32,31	31,8

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			06.01.2017	
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

CTS 23

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

aaa

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605238	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	0°/90° Lagenaufbau + 3x PeelPly
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,35	1,33	1,32	1,33
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	49,2442	48,5157	47,5811	48,4470
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,4490	0,4296	0,4364	0,4384
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	49,5915	48,8475	47,9182	48,7857
Fasermasse	m_F [g]	0,3473	0,3318	0,3372	0,3388
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,622	1,622	1,627	1,62
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	77,34	77,24	77,25	77,3
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	22,66	22,76	22,75	22,7
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	70,09	69,99	70,22	70,1
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	28,05	28,19	28,25	28,2

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			06.01.2017	CTS 23
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

bbb

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605239	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	±45° Lagenaufbau + 3x PeelPly
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,33	1,34	1,34	1,34
Masse des Glasfiltertiegel	m2 [g]	47,8366	47,8348	48,0912	47,9209
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m1 [g]	0,4529	0,4560	0,4529	0,4539
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m3 [g]	48,1882	48,1924	48,4409	48,2738
Fasermasse	mF [g]	0,3516	0,3576	0,3497	0,3530
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,614	1,612	1,617	1,61
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	77,64	78,42	77,22	77,8
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	22,36	21,58	22,78	22,2
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	70,01	70,62	69,76	70,1
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	27,55	26,56	28,12	27,4

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			06.01.2017	CTS 23
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

ccc

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605240	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	04.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	quasiisotropher Lagenaufbau + 3x PeelPly
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,31	1,35	1,33	1,33
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,9036	48,9152	49,1536	48,9908
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,4507	0,4363	0,4440	0,4437
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	49,2499	49,2537	49,4986	49,3340
Fasermasse	m_F [g]	0,3463	0,3385	0,3450	0,3433
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,633	1,625	1,626	1,63
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	76,83	77,59	77,71	77,4
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	23,17	22,41	22,29	22,6
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	70,09	70,44	70,59	70,4
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	28,89	27,80	27,66	28,1

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:			04.01.2017	CTS 23
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

ddd

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605241	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	0°/90° Lagenaufbau ohne PeelPly
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,50	1,51	1,51	1,51
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	48,0169	48,8220	48,7461	48,5283
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,5036	0,4892	0,4993	0,4974
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	48,3515	49,1437	49,0784	48,8579
Fasermasse	m_F [g]	0,3346	0,3217	0,3323	0,3295
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,584	1,587	1,586	1,59
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	66,43	65,75	66,56	66,2
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	33,57	34,25	33,44	33,8
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	58,79	58,29	58,97	58,7
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	40,59	41,49	40,48	40,9

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:	X		06.01.2017	CTS 23
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

eee

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605242	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	06.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	±45° Lagenaufbau ohne PeelPly
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,54	1,52	1,53	1,53
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	47,6481	48,4129	49,4290	48,4967
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,5036	0,4892	0,4993	0,4974
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	47,9500	48,7131	49,7362	48,7998
Fasermasse	m_F [g]	0,3019	0,3002	0,3072	0,3031
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,584	1,587	1,586	1,59
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	59,95	61,38	61,52	60,9
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	40,05	38,62	38,48	39,1
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	53,05	54,42	54,51	54,0
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	48,42	46,79	46,59	47,3

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:	X		06.01.2017	CTS 23
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

fff

COTESA COMPOSITES

PRÜFPROTOKOLL
Bestimmung der Faser-, Harz- und Porenanteile

Parameter:

Testlabor:	WL-COTESA GmbH	Prüfnorm:	DIN EN 2564
Auftragsnummer:	WLA-201605243	Bestimmungsverfahren:	B
Auftraggeber:	IKTS-Dresden	Probenanzahl:	3
Bestellnummer:	CTS_WLB-INT-533	Projektnummer:	externer Auftrag
Kunde:	Schubert	Material-Nr.:	C1100074-00
Prüfdatum:	04.01.2017	Spezifikation / Issue:	IPS 05-01-002-02 4
Prüfer:	H.Uhle	Prüflos-, Chargen-Nr:	quasiisotropher Lagenaufbau ohne PeelPly
Prüftemperatur:	23,2°C	Probendichte:	-
rel. Luftfeuchte:	45,9%	Konditionierung soll *(ist)* :	>2h bei 23±2°C/50±5% (15d bei 23°C/52%)
Datenlogger:	PM385	Prüfbed. Ofen soll *(ist)* :	>45min bei 120°C; (2h bei 130°C)
Messmittel:	PM131	Anforderung Ψ_F [%]:	
Prüfmittel:	PM810	Ψ_H [%]:	
Kalibriert bis:	Aug 17	Φ_F [%]:	56 - 64
Prüfsoftware:	Sartorius Wedge	Φ_H [%]:	
		Materialbezeichnung:	977-2-34-24KIMS-194-1200

$$\Psi_H = 100 - \Psi_F$$

$$\Phi_F = \Psi_F * \frac{\rho_G}{\rho_F} = \frac{1}{1+(\frac{\Psi_H * \rho_F}{\Psi_F * \rho_H})} * 100$$

$$\Psi_F = 100 * \frac{(m_3 - m_2)}{m_1}$$

$$\Phi_H = (100 - \Psi_F) * \frac{\rho_G}{\rho_H}$$

Ergebnisse:

Merkmal	Formel-zeichen	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittelwert
Probekörperdicke	d [mm]	1,50	1,51	1,51	1,51
Masse des Glasfiltertiegel	m_2 [g]	49,0196	48,3897	48,8406	48,7499
Ausgangsmasse gehärtete Probe	m_1 [g]	0,5176	0,5073	0,5028	0,5092
Masse Glasfiltertiegel und Faserrückstand	m_3 [g]	49,3659	48,7234	49,1700	49,0864
Fasermasse	m_F [g]	0,3464	0,3337	0,3294	0,3365
Faserdichte (Zertifikatswert)	ρ_F [g/cm³]	1,79			1,79
Harzdichte (Zertifikatswert)	ρ_H [g/cm³]	1,31			1,31
Probekörperdichte	ρ_G [g/cm³]	1,579	1,576	1,573	1,58
Fasermasseanteil	Ψ_F [%]	66,92	65,78	65,52	66,1
Harzmasseanteil	Ψ_H [%]	33,08	34,22	34,48	33,9
Faservolumenanteil	Φ_F [%]	59,03	57,91	57,57	58,2
Harzvolumenanteil	Φ_H [%]	39,87	41,17	41,41	40,8

Bemerkung:

Die Werte erfüllen die Anforderung der Spezifikation:	X		04.01.2017	CTS 23
	JA	NEIN	Datum	Unterschrift/Signum

Der Prüfer bestätigt mit Unterschrift bzw. Ablage des Prüfprotokolls die Durchführung der Prüfung gemäß Prüfvorgaben und die Verwendung von kalibrierten Prüfequipment.

Anhang Abbildung 61 Prüfprotokoll der Bestimmung des Faservolumengehaltes der Probenserien 5217-5234

Prepreg: 977-2-34-24KIMS-194-1200 (Grade A)

Property	Test Method	Units	Nominal Value
Resin density	ISO1183 Method A	g/cm³	1.31
Fibre density	ISO 10119	g/cm³	1.79
Cured ply thickness *	-	mm	0,184 (for FAW 194g/m², 34%RC) 0,250 (for FAW 268g/m², 33%RC) 0,260 (for FAW 268g/m², 35%RC)
Laminate density	-	g/cm³	1,60
* in accordance with the nominal resin content and nominal FAW assuming zero bleed			

Property		No. of tests	Test method	Units	Requirements [1]		
					Grade A	Grade C	Grade B
Prepreg areal weight		3	EN2557	g/m^2	293±10 Av. 293±1 Ind.	400±12 Av. 400±17 Ind.	412±15 Av. 412±20 Ind.
Fiber areal weight		3	EN2559 C Solvent: NMP or Dichloromethane	g/m^2	194±8 Av. 194±10 Ind.	268±6 (±7) Av. 268±8 Ind. [2]	268±10 Av. 268±15 Ind.
Volatile content		3	EN2558 20 minutes at 120ºC	% weight	< 0.8		
Resin content		3	EN2559 C Solvent: NMP or dichlorometane	% weight	34±2,0 Av. 34±2,5 Ind.	33±1,5 (±1,7) Av. 33±2,0 Ind. [2]	35±2,0 Av. 35±2,5 Ind.
HPLC	P1	1 specimen 2 injections	AITM3-0001 + Appendix to IPS (Issue 09)	%	15 – 19		
	P2				20 – 26		
	P4				21 – 26		
	P5 [3]				1 – 5 [4] 2 – 9 [5]		
	P3/P4			---	< 0.1		
Gravimetry	Modifier	1		%	25 – 32		
DSC	Tg	1	AITM3-0002 Heating rate: 20ºC/min	ºC	(-4) – (+10)		
	Tos			ºC	200 – 214		
	- ΔH_{100}			J/g	315 – 515		

Table 7: Release Tests- Mechanical properties (see Paragraph 8.2)

Property [5]		Test method	Units	Test condition	Test Temp (ºC)	Requirements Grade A or B			
						$X_{average}$		X_{ind}	
						Min	Max	Min	Max
Tg	Onset	AITM 1-0003 (5ºC/min)	ºC	Dry [2]	-	>168			
	Loss					>175			
Tensile [1] (0º)	Strength	EN 2561 Type B [7]	MPa	Dry	RT	2400	3150	2200	3300
	Modulus		GPa			160 [6]	185 [6]	155 [6]	190 [6]
Interlaminar shear Strength (0º) [3]		EN 2563	MPa	Dry	RT	108 [6]	130 [6]	105 [6]	131 [6]
					120	67	83	65	85
Extent of cure [4]		AITM 3-0008	%	-	-	> 90			
Cured ply thickness in accordance with the nominal resin content and nominal FAW assuming zero bleed		[8]	mm	-	-	Grade A	34%	0.184 ±0.007	
						Grade B	33%	0.250 ±0.009	
							35%	0.260 ±0.011	

Notes:
$X_{average}$: average value X_{ind}: individual value

1. Tensile Strength/modulus is calculated using a theoretical cured ply thickness of 0.184 mm (Grade A) and 0.250mm (Grade B)
2. 1 specimen to be tested. Drying conditions: 1 week at 105ºC or 12h at 110ºC(requirement not applicable to RDS equipments).
3. Interlaminar shear strength calculated with actual thickness.
4. Guaranteed value. Not to be tested for batch release.
5. In addition the thickness per ply should be reported for every tests specimens
6. To be revised after the first 10 batches tested
7. To be revised after 5 batches of Grade A and 3 batches of Grade B tested in both conditions
8. Test method to be agreed between Manufacturer and AIRBUS

Prepreg 977-2-35-12KHTS-134-300

Property		No. of tests	Test method	Unit	Requirements [1]			
					AIMS05-01-001 A/B		AIMS05-01-001 D/E	
					Individual	Average	Individual	Average
Prepreg areal weight		3	EN 2557	g/m^2	206±10* 223±10**	206±8* 223±8**	412±20* 446±20**	412±15* 446±15**
Fibre areal weight		3	EN 2559 C Solvent: NMP or Dichloromethane	g/m^2	134±8	134±5	268±15	268±10
Volatile content		3	EN 2558 20min at 120°C	% weight	< 0.8			
Resin content		3	EN 2559 C Solvent: NMP or Dichloromethane	% weight	35±2.5 40±2.5	35±2 40±2	35±2.5 40±2.5	35±2 40±2
HPLC	P1	2 specimen 2 injections	AITM 3-0001	%	15 - 19			
	P2				20 - 26			
	P4				21 - 26			
	P5 [2]				1 - 5 [3] 2 - 9 [4]			
	P3/P4			-	≤ 0.10			
Gravimetry	Modifier content	1		%	25 - 32			
DSC	Tg	1	AITM 3-0002 Heating rate: 20°C/min	°C	(-4) - (+10)			
	Tos			°C	200 - 214			
	$-\Delta H_{100}$			J/g	315 - 515			

Property	No. of tests	Test method	Unit	Requirements [1]			
				AIMS05-01-001 A/B		AIMS05-01-001 D/E	
				Individual	Average	Individual	Average
Resin flow	Guaranteed	EN 2560 180°C/ 30min / 6bar	% weight	20 ± 7			
Impregnation level 5) (Water Pick –up)	3	AITM 2-0061	%	N/A		≤ 2% [6]	

Notes:

* 35% resin content / **40% resin content
1) If not otherwise mentioned, requirements applicable to average values, except for HPLC. For this test, average value and at least one individual value (where two tests are performed) must meet the requirement. One 'out of specification' value is allowed, provided that the 'in specification' value equals the mid-point of the requirement range or is on the same side of the mid-point as the 'out of specification' value.
2) Only applicable for tack enhanced material.
3) For T1 material
4) For T2 material
5) Test is only applicable for a product Grade D/E for Airbus Operation GmbH, Plant Stade, Application A330/340 RPB (Cytec reference 89152995 and 89152998). Applicable for other applications, if requested and approved by purchaser and Cytec.
6) Requirement is only applicable for a product Grade D/E product for Airbus Operation GmbH, Plant Stade, Application A330/340 RPB (Cytec reference 89152995 and 89152998).. Applicable for other applications, if requested and approved by purchaser and Cytec.

Table 6: Release tests – Mechanical properties

Property [1]		Test method	Unit	Test condition	Test temp (°C)	Requirements AIMS05-01-001 A/B/D/E			
						$X_{average}$		X_{ind}	
						Min	Max	Min	Max
Tg [2]	Onset	AITM 1-0003 (5°C/min)	°C	Dry [3]	-			>168	
	Loss							>175	
Tensile [5] (0°)	Strength	EN 2561 Type B	MPa	Dry [4]	RT	2250	2550[9]	2100	2700[9]
	Modulus [6]		GPa			140	150	135	155
Interlaminar Shear [7] Strength (0°)		EN 2563	MPa	Dry [4]	RT	110	127[9]	105	132[9]
					120	68	82[9]	65	84[9]
Extent of cure [8]		AITM 3-0008	%	-	-			> 90	

Notes:

$X_{average}$: average value X_{ind}: individual value

1) In addition the thickness per ply should be reported for every test specimen
2) - 1 specimen to be tested
   - T.A. Q800 DMA equipment is allowed (in addition to AITM 1-0003)
3) Drying conditions: 1 week at 105°C or 12h at 110°C (Requirement is not applicable to RDS equipments)
4) Dry conditions according to EN 2743
5) Tensile Strength / modulus is calculated using a theoretical cured ply thickness of 0.125mm (AIMS05-01-001A/B) or 0.250mm (AIMS05-01-001D/E)
6) Use of secant points at 3 kN and 15 kN to be agreed between manufacturer and supplier.
7) Interlaminar shear strength is calculated with actual thickness
8) Guaranteed value. Not to be tested for batch release.
9) Applicable if requested by the purchaser. These limits can be used as survey limits.

Prepreg: HM-64-270-ER450-K63712-33%-600

3.5 Physical-chemical characteristics of the uncured prepreg

#	*Characteristic*	*Test method*	*Unit*	*Requirements*
1	Prepreg areal weight	EN 2557	g/m²	386 - 422
2	Tape (UD) areal weight	EN 2559	g/m²	270 ± 13,5
3	Resin content (acc. CMS-003_BBL002)	EN 2559	%	33 ±3 (±4 individual)
4	Tack (23±1,0°C / 50±2%)	CPV-131	n/a	Ranking IV
5	Resin flow (Guaranteed value)[1]	EN 2560	%	4,0-14,0
6	DSC T_g uncured[2]	acc. to EN 6041	°C	≤ 10
7	DSC T_{onset}	acc. to EN 6041	°C	≥ 147
8	DSC T_{peak}	acc. to EN 6041	°C	≥ 162

3.6 Minimum mechanical characteristics

3.6.1 Carbon fiber HM K63712

Characteristic	*Test method*	*Test conditions*	*Unit*	*Minimum Individual*	*Average*
Tensile strength, 0°	EN 2561	23±2°C / 60±5%RH	N/mm²	-	≥ 2620
E-Modul 0° - tension	EN 2561	23±2°C / 60±5%RH	GPa	-	≥ 634
Fiber Density	ISO 10119	23±2°C / 60±5%RH	g/cm³	-	2,12
Ultimate elongation	EN 2561	23±2°C / 60±5%RH	%	-	0,4

3.6.2 Minimum mechanical characteristics of the cured laminate

Characteristic	*Test method*	*Test conditions*	*Unit*	*Minimum Individual*	*Average*
Tensile strength, 0°	EN 2561	23±2°C / 60±5%RH	N/mm²	≥ 1050	≥ 1100
E-Modul 0° - tension	EN 2561	23±2°C / 60±5%RH	GPa	≥ 300	≥ 315

Characteristic	*Test method*	*Unit*	*Requirements*
Glas transition temperature T_g	acc. to EN 6064	°C	≥ 145[3]
Cured ply thickness	-	mm	0,24

Anhang Abbildung 62 Prepregeigenschaften bezüglich den Faserfestigkeiten der Proben der Parameterstudie